

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANIEL FABIAN BETTÚ

NOVA METODOLOGIA PROBABILÍSTICA MULTIVARIADA PARA MAPEAMENTO
DE UNIDADES DE PAISAGEM GEOMÓRFICAS

CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS
PASSAÚNA E BARIGÜI

Tese de doutorado apresentada como requisito
parcial à obtenção do grau de Doutor, Curso de
Pós-Graduação em Geologia Ambiental,
Departamento de Geologia, Setor de Ciências da
Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:
Prof. Dr. Luiz Eduardo Mantovani

Co-orientadores:
Prof^a. Dr^a. Chisato Oka-Fiori
Prof. Dr. Paulo Cesar Soares

CURITIBA
2012

TERMO DE APROVAÇÃO

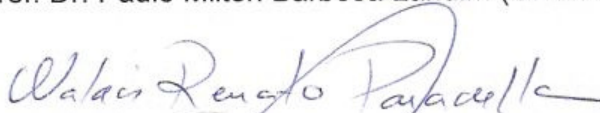
DANIEL FABIAN BETTÚ

"Novo Método Probabilístico multivariado para Mapeamento de Unidades de Paisagem Geomórficas – Caracterização Geoambiental das Bacias Hidrográficas dos Rios Passaúna e Barigui - PR"

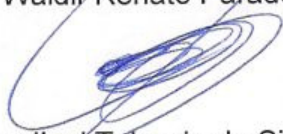
Tese de doutorado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná, Comissão formada por:



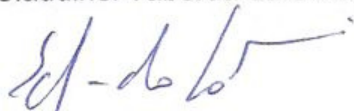
Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim (UNESP)



Prof. Dr. Waldir Renato Paradella (INPE)



Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira (UFPR)



Prof. Dr. Eduardo Salamuni (UFPR)



Prof. Dr. Luiz Eduardo Mantovani (UFPR)

Presidente

Curitiba, 5 de julho de 2012

RELATÓRIO DA DEFESA DE TESE (40)

Aos cinco dias do mês de julho de 2012, na sala PH-05 do Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, foi instalada pelo Professor Doutor Luiz Alberto Fernandes, a quadragésima Banca Examinadora da Tese de Doutorado em Geologia, Área de Concentração Geologia Ambiental. Estiveram presentes à sessão, professores, alunos e visitantes.

A Banca Examinadora, atendendo determinação do Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Geologia, foi constituída pelos professores doutores Paulo Milton Barbosa Landim (UNESP), Prof. Dr. Waldir Renato Paradella (INPE), Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira (UFPR), Prof. Dr. Eduardo Salamuni (UFPR), Luiz Eduardo Mantovani orientador principal, a quem coube a presidência da sessão.

Às 09:00h horas a Banca Examinadora iniciou seus trabalhos, convidando o candidato Daniel Bettú, a apresentar sua Tese, intitulada *"Novo Método Probabilístico multivariado para Mapeamento de Unidades de Paisagem Geomórficas – Caracterização Geoambiental das Bacias Hidrográficas dos Rios Passaúna e Barigüí – PR"*.

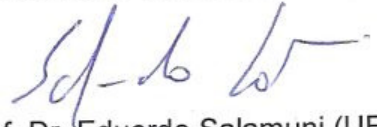
Encerrada a apresentação, iniciou-se a arguição pelos membros da Banca Examinadora, após a qual a mesma reuniu-se para julgamento de desempenho do candidato. A Banca Examinadora considerou os resultados como uma contribuição relevante para o desenvolvimento do tema. Durante a arguição o candidato demonstrou conhecimento do tema. Considerando o conteúdo, a apresentação e a defesa, a banca decidiu pela APROVAÇÃO da Tese de Doutorado.


Curitiba, 05 de julho de 2012.


Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim (UNESP)


Prof. Dr. Waldir Renato Paradella (INPE)


Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira (UFPR)


Prof. Dr. Eduardo Salamuni (UFPR)


Prof. Dr. Luiz Eduardo Mantovani (UFPR)

Presidente

DANIEL FABIAN BETTÚ

NOVA METODOLOGIA PROBABILÍSTICA MULTIVARIADA PARA
MAPEAMENTO DE UNIDADES DE PAISAGEM GEOMÓRFICAS –
CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS
RIOS PASSAÚNA E BARIGUI

Tese de doutorado apresentada como
requisito parcial à obtenção do grau de
Doutor, Curso de Pós-Graduação em
Geologia Ambiental, Departamento de
Geologia, Setor de Ciências da Terra,
Universidade Federal do Paraná.

Orientador:
Prof. Dr. Luiz Eduardo Mantovani

Co-orientadores:
Prof^a. Dr^a. Chisato Oka-Fiori
Prof. Dr. Paulo Cesar Soares

CURITIBA

2012

*“Fica decretado
que todos os dias da semana,
inclusive as terças-feiras
mais cinzentas, têm direito
a converter-se em manhãs
de domingo.”*

Thiago de Mello
Os Estatutos do Homem
Artigo Segundo

Dedicado à minha família,
especialmente a meus pais
Saulo e Nina, que apontaram o caminho, a
Ana, meu porto seguro, e ao pequeno
Henrique, que a cada sorriso me ensina o
que realmente é prioridade.

Agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível sem a cooperação e dedicação de pessoas e instituições, às quais quero registrar meus votos de estima e gratidão:

À Fundação Araucária pelo suporte financeiro ao projeto de pesquisa ora apresentada e a Capes – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pela concessão de bolsa de doutorado;

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Departamento de Geologia da UFPR, em especial aos amigos Luiz Alberto Fernandes e Daniel Mittelbach pela colaboração e solução de questões inerentes às atividades acadêmicas;

Aos colegas Francisco Ferreira e Luís Gustavo de Castro, do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada da UFPR, pela disposição em ceder, processar e interpretar os dados aerogeofísicos da área, apesar da impossibilidade de sua aplicação;

Aos amigos Gustavo e Camila Athayde, sempre atentos aos prazos e demais atividades acadêmicas, além de dispostos a discussões sobre nossas pesquisas;

Ao professor Leonardo Cury, pelas dicas, conselhos e ajuda no estágio em prática de docência;

Aos orientadores, por nortearem meu amadurecimento científico, pelo tempo dedicado e disposição em postergar seus demais compromissos para ajudar no desenvolvimento desta pesquisa, e pela atenção dispensada nas revisões dos resultados e textos produzidos;

Aos colegas Fabiana Bettú e Rafael Canata, que, além do apoio extra-acadêmico, foram fundamentais na produção do volume final da pesquisa no que diz respeito à produção do material cartográfico e revisão do texto;

À Ana, minha parceira, por compreender e relevar minha ausente presença em casa nos meses finais de pesquisa, assumindo a exaustiva tarefa de cuidar de nosso filho, minha eterna gratidão.

Sumário

1.	Introdução.....	1
2.	Estado da arte	5
2.1.	O que é a paisagem.....	5
2.2.	Paisagem: Visão Sistêmica.....	6
2.3.	Ecologia da paisagem.....	7
2.4.	Estrutura da paisagem	8
2.5.	Unidades de Paisagem	9
2.6.	Geomorfologia da paisagem	10
2.7.	Cartografia geomorfológica e de unidades de paisagem	12
2.8.	Mapeamento geomorfométrico	16
3.	Caracterização do problema.....	24
3.1.	Mudanças ambientais	27
4.	Objetivos.....	28
5.	Objeto de pesquisa.....	30
5.1.	Contexto geológico das bacias do Passaúna e Barigui	33
5.2.	Contexto geomorfológico das bacias do Passaúna e Barigui	37
5.3.	Descrição das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui	43
5.4.	Solos	45
5.5.	Clima.....	47
5.6.	Características hipsométricas das bacias dos rios Passaúna e Barigui	47
6.	Hipótese de trabalho.....	52
7.	Materiais	53
8.	Metodologia proposta	56
9.	Fundamentação teórica da metodologia.....	67
10.	Trabalhos desenvolvidos	71
10.1.	Processamento dos atributos descritores do relevo.....	71
10.2.	Análise geomorfométrica com parâmetros geoestatísticos do relevo	82

10.2.1. Índice de rugosidade do relevo (IRR)	84
10.2.2. Índice de angulosidade do relevo (IAN).....	85
10.2.3. Índice de densidade de relevo (IDR)	88
10.2.4. Índice de anisotropia de relevo (IAR) e direção de anisotropia	89
10.2.5. Dimensão fractal do relevo e ajuste da dimensão fractal .	92
10.3. Seleção dos atributos descritores do relevo.....	102
10.3.1. Análise da independência dos atributos descritores do relevo	102
10.3.2. Discretização dos atributos descritores do relevo	104
10.4. Definição das UPGs a serem mapeadas	105
10.5. Composição dos modelos conceituais das UPGs.....	122
10.5.1. UPG 1 – Domínio de vertentes suaves (DVS).....	125
10.5.2. UPG 2 – Domínio de vertentes esculpidas (DVE)	126
10.5.3. UPG 3 – Domínio das cristas e vales orientados (DCVO)....	127
10.5.4. UPG 4 – Domínio de colinas suaves (DCS)	129
10.5.5. UPG 5 – Domínio das vertentes em dissecação acentuada (DVDA)	130
10.6. Análise de favorabilidade para a ocorrência das UPGs	132
10.7. Composição dos modelos probabilísticos	134
10.7.1. Aplicação do modelo probabilístico	135
10.7.2. UPG 1 - Domínio das vertentes suaves (DVS).....	137
10.7.3. UPG 2 - Domínio das vertentes esculpidas (DVE)	140
10.7.4. UPG 3 - Domínio das cristas e vales orientados (DCVO)	142
10.7.5. UPG 4 – Domínio de colinas suaves (DCS)	145
10.7.6. UPG 5 – Domínio das vertentes em dissecação acentuada (DVDA)	148
10.8. Mapa das Unidades de Paisagem Geomórficas das bacias dos rios Passaúna e Barigui.....	151
11. Discussão dos resultados.....	154
12. Conclusões.....	170

13.	Recomendações de trabalhos futuros	173
14.	Referências bibliográficas.....	174

Lista de Figuras

FIGURA 1. Localização da área de estudo. Bacias hidrográficas dos rios Barigui e Passaúna.	33
FIGURA 2. Mapa litológico das bacias dos rios Passaúna (esquerda) e Barigui (direita) (AGUASPARANÁ, 2011), indicando a projeção dos perfis geológicos simplificados (FIGURA 57).....	34
FIGURA 3. Mapa geomorfológico das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui. (MINEROPAR, 2006).	42
FIGURA 4. Rede hidrográfica das bacias dos rios Passaúna (esquerda) e Barigui (direita).	44
FIGURA 5. Mapa de solos das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui (modificado de EMBRAPA, 2008).	46
FIGURA 6. Curva hipsométrica da bacia do rio Passaúna (vermelho). Em azul é mostrada a linha de tendência logarítmica ajustada à curva hipsométrica. Nota-se que a curva pode ser dividida em três segmentos (A, B e C) por dois pontos de quebra, correspondentes a três estágios evolutivos, conforme (SOARES; RIFFEL, 2006).....	48
FIGURA 7. Curva hipsométrica da bacia do rio Barigui (vermelho). Em azul é mostrada a linha de tendência logarítmica ajustada à curva hipsométrica. Nota-se que a curva pode ser dividida em três segmentos (A, B e C) por dois pontos de quebra, correspondentes a três estágios evolutivos, conforme (SOARES; RIFFEL, 2006).....	48
FIGURA 8. Histograma de frequência de altitudes da bacia do rio Passaúna. Intervalos de classes de 5m.	50
FIGURA 9. Histograma de frequência de altitudes da bacia do rio Barigui. Intervalos de classes de 5m.	51
FIGURA 10. Fluxograma metodológico proposto para cartografia de UPGs.	66
FIGURA 11. Mapa hipsométrico das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui, a partir dos dados SRTM-NASA.....	72

FIGURA 12. Mapa de declividades do terreno das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.....	73
FIGURA 13. Mapa de forma das encostas (curvatura em planta) das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.....	74
FIGURA 14. Mapa de forma das encostas (curvatura em perfil) das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.....	75
FIGURA 15. Variograma dos valores altimétricos do setor norte da área de pesquisa (relevo mais acentuado). Distância máxima dos passos 2200m. Passos com 180m. Primeiro pico da variância em aproximadamente 720m. Construído na direção com maior variância: NW-SE.	76
FIGURA 16. Mapa do índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI – das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.....	80
FIGURA 17. Mapa do índice de umidade por diferença normalizada – NDWI – das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.....	81
FIGURA 18. Exemplo da sucessão de cálculos da semivariância direcional em janelas móveis e os semivariogramas gerados para cada cela (neste caso para a direção N45°).....	83
FIGURA 19. Efeito da rugosidade na construção de um semivariograma com a distância do primeiro passo maior que zero. Enquanto as variações altimétricas de grande amplitude (Z) são representadas nos passos do semivariograma, amplitudes menores que o limite mínimo de tolerância do primeiro passo (janela tracejada), como o caso da rugosidade do relevo (X), são englobadas como parte do efeito pepita. (BETTÚ: SOARES, no prelo – Anexo 1)	85
FIGURA 20. Relevos hipotéticos e respectivas funções semivariogramas. À esquerda: predomínio de vertentes côncavo-convexas sucessivas. No meio: relevo aplainado com remanescentes convexos; e à direita: relevo aplainado com remanescentes côncavos. A linha horizontal cheia é a semivariância máxima e a linha horizontal pontilhada é a semivariância média. ATS é a área total do semivariograma e AFS é a área da função semivariograma.	86
FIGURA 21. Lógica para cálculo da densidade de relevo (DR). Os comprimentos planares médios das vertentes (CMV e CMV') são proporcionais	

à metade do lado do quadrado circunscrito à sua projeção em planta (círculos – área média das unidades de relevo). Para cálculo da DR, relaciona-se a área média das unidades de relevo a uma área de pesquisa com dimensão pré-estabelecida (quadrado tracejado), p.ex. 1Km²..... 89

FIGURA 22. Comparação entre dois relevos hipotéticos com IAR diferentes. À esquerda: relevo com IAR muito baixo, onde as médias das semivariâncias multidirecional (γ_{mMD}) e na direção com maiores CPVs (γ_{mM}) é muito próxima no primeiro terço dos semivariogramas. À direita: relevo com elevado IAR, onde a diferença entre as médias das semivariâncias iniciais (γ_{mMD} e γ_{mM}) é mais expressiva. 90

FIGURA 23. Determinação da semivariância omnidirecional (azul - CMV) e na direção com maior CPV (vermelho), respectivamente γ_{mMD} e γ_{mMV} , para o primeiro terço dos semivariogramas..... 92

FIGURA 24. Relação entre os variogramas logarítmicos para duas diferentes direções. α e β representam os ângulos que as retas ajustadas por regressão linear fazem com o eixo das abcissas. 94

FIGURA 25. Mapa de índice de rugosidade do relevo (IRR) das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui. 95

FIGURA 26. Mapa de índice de angulosidade do relevo (IAN) das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui. 96

FIGURA 27. Mapa de índice de densidade de relevo (IDR) das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui. 97

FIGURA 28. Mapa do índice de anisotropia de relevo (IAR) das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui. 98

FIGURA 29. Mapa de direção de anisotropia de relevo das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui 99

FIGURA 30. Mapa da dimensão fractal do relevo das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui. 100

FIGURA 31. Mapa de ajuste da dimensão fractal das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui. 101

FIGURA 32. Unidades de paisagem geomórfica determinadas a priori com base em informações de campo (pontos) e análise da textura de relevo sobre o MDET. 107

FIGURA 33. Característica da UPG 1 (1.1) próximo à foz do rio Barigui, Cidade Industrial de Curitiba. Ponto de campo 34.	109
FIGURA 34. Ocupação urbana consolidada na UPG 1 (1.4), região da sede municipal de Almirante Tamandaré.	110
FIGURA 35. Vista panorâmica da região de São Miguel (interior de Almirante Tamandaré), mostrando a planície cárstica na porção rebaixada do relevo (UPG 1.4), com o relevo ao fundo sustentado por cristas de quartzito.	110
FIGURA 36. Relação entre as vertentes esculpidas (ao fundo) com as pequenas planícies aluvionares no interior da UPG 2.1. Ponto de verificação de campo 28.	112
FIGURA 37. Vista panorâmica da UPG 2.1, mostrando os dois padrões de uso do solo mais comuns, áreas agrícolas e remanescentes florestais. Ponto de verificação de campo 27.	113
FIGURA 38. Exemplo da rugosidade do relevo característica da UPG 2 (UPG 2.1). ponto de verificação de campo 29.....	113
FIGURA 39. Remanescente das paleosuperfícies PS1/Pd1 (latossólica) e PS2/Pd2 (húmica) em alto estrutural, conforme Riffel (2006) e Ab'Saber e Bigarella (1961). Próximo ao ponto de verificação de campo 19 – UPG 2.3..	114
FIGURA 40. Crista de quartzito orientada na direção NE-SW, sustentado o relevo acentuado na UPG 3.2. A norte do ponto de verificação de campo 09.	116
FIGURA 41. Relevo ondulado com crista de quartzito (NE-SW) sustentando o relevo na UPG 3.3. Ponto de verificação de campo 11.	116
FIGURA 42. Cristas e vales orientados na direção NE-SW, nas proximidades do ponto de verificação do afloramento 10, UPG 3.3.....	116
FIGURA 43. Depósito coluvionar em rampa, comum nas vertentes inclinadas da UPG 3. Ponto de verificação de campo 10.....	117
FIGURA 44. Ocupação urbana em fase adensamento na UPG 4.3. Ponto de verificação de campo 40.	119
FIGURA 45. Vale do rio Barigui, nas proximidades do parque homônimo, interior da UPG 4.3. Ocupação urbana residencial de baixa densidade, consolidada. Próximo ao ponto de verificação de campo 40.	119

FIGURA 46. Vale em dissecação, com remanescentes florestais em estágios diversos de regeneração na UPG 5.1. Ponto de verificação de campo 15.	121
FIGURA 47. Vale em dissecação acentuada na UPG 5.2. Uso do solo agrícola e de remanescentes florestais. Ponto de verificação de campo 26..	121
FIGURA 48. Área urbana residencial com baixa densidade de ocupação, interior da UPG 5.3. Ponto de verificação de campo 44.	122
FIGURA 49. Mapa de UPGs para as bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui elaborado através de classificação de agrupamento por k-médias das classes de atributos descritores do relevo.	124
FIGURA 50. Representação gráfica da soma complementar entre as probabilidades de não-ocorrência, de ocorrência de um dado evento e da ambiguidade (probabilidade de ocorrência e de não-ocorrência simultâneas)	136
FIGURA 51. À esquerda: mapa de chance de ocorrência do domínio das vertentes suaves (DVS), sobreposto pelas celas identificadas como pertencendo ao domínio pelo método de agrupamento (k-médias – pontos). À direita: o mapa de ambiguidade da análise de favorabilidade.....	139
FIGURA 52. À esquerda: mapa de chance de ocorrência do domínio das vertentes esculpidas (DVE), sobreposto pelas celas identificadas como pertencendo à unidade por agrupamento (k-médias – pontos). À direita: o mapa de ambiguidade da análise de favorabilidade.	141
FIGURA 53. À esquerda: mapa de chance de ocorrência do domínio das cristas e vales orientados (DCVO), sobreposto pelas celas identificadas como pertencendo à unidade por agrupamento (k-médias – asteriscos). À direita: o mapa de ambiguidade da análise de favorabilidade.....	144
FIGURA 54. À esquerda: mapa de chance de ocorrência do domínio de colinas suaves (DCS), sobreposto pelas celas identificadas como pertencendo à unidade por agrupamento (k-médias – pontos). À direita: o mapa de ambiguidade da análise de favorabilidade.	147
FIGURA 55. À esquerda: mapa de chance de ocorrência do domínio das vertentes em dissecação acentuada (DVDA), sobreposto pelas celas	

identificadas como pertencendo à unidade por agrupamento (k-médias – pontos). À direita: o mapa de ambiguidade da análise de favorabilidade. 150

FIGURA 56. Mapa de unidades de paisagem das bacias dos rios Barigui e Passaúna, a projeção em planta dos perfis geológicos simplificados elaborados. 152

FIGURA 57. Perfis geológicos simplificados. 153

FIGURA 58. Gráfico de dispersão dos valores dos atributos rugosidade e densidade de relevo, mostrando uma linha de tendência onde o coeficiente de correlação de Pearson tem valor 1 e o ajuste dos dados à esta tendência (R^2). 158

Lista de Tabelas

TABELA 1. Matriz de similaridade entre os atributos (coeficiente de correlação Pearson).	103
TABELA 2. Relações de interdependência importantes entre os atributos descritores do relevo.	103
TABELA 3. Estatísticas dos atributos descritores do relevo, limites naturais (três classes com igual frequência) e limites usados para incorporação da incerteza da informação.	105
TABELA 4. Resultados da análise de favorabilidade das evidências para ocorrência do domínio das vertentes suaves (DVS), em ordem decrescente de contraste.	137
TABELA 5. Resultados da análise de favorabilidade para ocorrência do domínio das vertentes esculpidas (DVE), em ordem decrescente de contraste.	140
TABELA 6. Resultados da análise de favorabilidade para ocorrência do domínio das cristas e vales orientados (DCVO), em ordem decrescente de contraste.	142
TABELA 7. Resultados da análise de favorabilidade para ocorrência do domínio de colinas suaves (DCS), em ordem decrescente de contraste.	145
TABELA 8. Resultados da análise de favorabilidade para ocorrência do domínio das vertentes em dissecação acentuada (DVDA), em ordem decrescente de contraste.	148

Lista de Quadros

QUADRO 1. Principais limitações encontradas nas classificações automatizadas de formas de relevo	26
QUADRO 2. Associação entre os tipos de solos presentes na área com a Geologia, relevo e paleosuperfícies.	45
QUADRO 3. Limites de classes para o atributo direção da anisotropia. Sem incerteza.	105
QUADRO 4. Lista de celas amostrais do DVS, exibindo as classes de atributos descritores do relevo.	126
QUADRO 5. Lista de celas amostrais do DVE, exibindo as classes de atributos descritores do relevo.	127
QUADRO 6. Lista de celas amostrais do DCVO, exibindo as classes de atributos descritores do relevo.	128
QUADRO 7. Lista de celas amostrais do DCS, exibindo as classes de atributos descritores do relevo.	130
QUADRO 8. Lista de celas amostrais do DVDA, exibindo as classes de atributos descritores do relevo.	131
QUADRO 9. Exemplo da configuração de uma tabela ternária para a ocorrência de uma dada UPG.	132
QUADRO 10. Exemplo da constituição da planilha de evidências para uma dada UPG, mostrando as classes de três atributos descritores do relevo. ...	133
QUADRO 11. Relação entre os valores de necessidade e suficiência para o cálculo da probabilidade de ocorrência de um dado evento (UPG), onde “p” é a probabilidade; “H” é a ocorrência do evento; “nH” é a não-ocorrência do evento; “Hi” é a incerteza da ocorrência do evento; “E” é a presença do atributo; e “nE” é a ausência do atributo.	136
QUADRO 12. Comparação entre os modelos conceituais e probabilísticos dos domínios das vertentes suaves (UPG 1 - DVS) e das vertentes esculpidas (UPG 2 - DVE).	162

QUADRO 13. Comparação entre os modelos conceituais e probabilísticos dos domínios das cristas e vales orientados (UPG 3 - DCVO), de colinas suaves (UPG 4 - DCS) e das vertentes em dissecação acentuada (UPG 5 – DVDA).	163
--	-----

Resumo

É apresentada uma nova metodologia para cartografia de Unidades de Paisagem Geomórficas (UPG), baseada em análise probabilística multivariada de dados de sensores remotos. A metodologia foi testada sobre uma série de atributos geomorfométricos derivados de dados altimétricos do sensor SRTM e atributos referentes ao uso do solo, gerados a partir de imagens multiespectrais Landsat 5. Foi adotada como área objeto de estudo duas bacias hidrográficas contíguas, nos rios Passaúna e Barigui, afluentes da margem direita do rio Iguaçu na região de Curitiba, sul do Brasil. Na área afloram rochas de composição e idades variadas, incluindo migmatitos e gnaisses do Complexo Atuba (Paleoproterozóico), embasamento geológico da área, metassedimentos do Grupo Açungui (Proterozóico Superior), rochas sedimentares da Bacia de Curitiba (Oligo-Mioceno), além de sedimentos aluvionares quaternários. Conforme estudos pretéritos na região, inserida em planaltos de dissecção, no Primeiro Planalto Paranaense, ocorrem remanescentes de duas paleosuperfícies no interior destas bacias hidrográficas, onde são encontradas unidades de paisagem atuais e pretéritas, incluindo remanescentes geomórficos e formações superficiais antigas. Adotou-se uma malha regular composta por celas numeradas, para as quais o processamento dos dados altimétricos resultou na geração dos seguintes atributos descritores do relevo: altitude, formas das encostas (em perfil e planta), declividade, rugosidade, angulosidade, densidade, anisotropia e direção de anisotropia de relevo, além dos índices de vegetação (NDVI) e de umidade (NWDI). Procedeu-se uma avaliação preliminar em campo, seguida por análise morfológica do modelo digital de elevação do terreno (MDET), buscando identificar unidades de paisagem geomórficas claramente distintas, de modo a realizar o teste metodológico de mapeamento automatizado destas unidades. Desta forma foram definidas cinco UPGs cujos atributos permitiram distingui-las em relação às demais: domínios das vertentes suaves (DVS), das vertentes esculpidas (DVE), das cristas e vales orientados (DCVO), das colinas suaves (DCS) e das vertentes em dissecção acentuada (DVDA). Através de análise de agrupamento das celas (k-médias), estas foram separadas em cinco grupos, compatíveis com as unidades previamente determinadas em campo e sobre o MDET. Através da análise dos atributos descritores do relevo, discretizados em classes (evidências), foram gerados modelos conceituais das unidades. Uma modificação da teoria da probabilidade condicional (regra de Bayes), caracterizada pela análise da incerteza da informação, permitiu aplicar uma classificação probabilística sobre os atributos descritores do relevo, visando associar as celas alvo do mapeamento aos modelos conceituais das UPGs previamente determinadas. Tal artifício resultou em modelos probabilísticos para a ocorrência das UPGs, com estimativa da confiabilidade da informação (ambiguidade). Comparando os modelos conceituais e probabilísticos verificou-se que houve grande compatibilidade entre as UPGs, indicando a robustez do método proposto, por meio da avaliação da ambiguidade envolvida na classificação. Por fim a verificação em campo dos indicadores da dinâmica ambiental forneceu parâmetros para o diagnóstico do significado geomórfico e ambiental das unidades presentes.

Abstract

The subject of this investigation was the Geomorphic Landscape Units concept and the use of digital elevation models as a quick way to classify and map extensively these units. Geomorphic Landscape Units (GLU) represents a dominion of terrain where the properties of relief are repetitives and homologues. The main challenge was the use of geostatistical variogram as a robust tool in order to identify properties as indexes of variability of 3D spatial data. The methodology developed was tested with geomorphometric derived from altimetric data (SRTM-NASA). The variograms of data are processed within a mobile window which results in relief descriptors attributes: altitude, profile and plan curvature, slope, roughness, smoothness, density, anisotropy and anisotropy direction; land use attributes were obtained by NDVI and NDWI indexes from Landsat 5 data. As test area it was used two hydrographic basin in the plateau of Curitiba, South Brazil. A preliminary field evaluation followed by morphological evaluation of digital elevation model results in five distinctive GLUs domains, identified as: low slope hills (DVS) domain, sculptured slopes hills (DVE) domain, notched ridges and valleys domain (DCVO), gentle hills domain (DCS) and domain of accentuated dissected slope hills (DVDA). By the cluster analysis (k-means) five groups of cells were defined, compatible with the pre-defined GLUs. Conceptual descriptive models were elaborated using the relief descriptors attributes. Each descriptive attribute was considered a spacial variable of landscape and used to classify de GLU that would include the cell point with greater probability. The algorithm used conditional probability method based in the Bayes' rule, modified to include uncertain. The favorability approach was used as a links between probabilistic classification and conceptual models of GLU, including the reliability of information. Comparison of probabilistic and conceptual models results on high compatibility that indicates the strength of proposed method. At the end, field verification of dynamic indicators provides parameters for the final diagnosis of geomorphic and ambient significance of classed units.

1. Introdução

Atualmente, governos e sociedades manifestam preocupações com as mudanças climáticas globais, e seus impactos relacionados ao uso e ocupação do solo. Fenômenos climáticos extremos (associados ou não às mudanças climáticas) são apresentados como as consequências mais evidentes dessas alterações e seus maiores impactos ocorrem principalmente sobre áreas inadequadamente ocupadas. Neste sentido, considera-se inadequada a ocupação consolidada em áreas suscetíveis aos efeitos de fenômenos climáticos extremos, que resultam, no Brasil, principalmente em inundações, escorregamentos, quedas de blocos, tombamentos, corridas de massa e processos erosivos, entre outros. Outros fenômenos também merecem destaque, como afundamentos cársticos, contração, expansão e também compactação de solo, que embora ainda não diretamente associados às alterações climáticas, restringem a adequação dos solos para usos e ocupações mais harmônicos.

O processo de ocupação do solo nas grandes cidades brasileiras é caracterizado por não obedecer a critério técnicos de planejamento, via de regra, seja visando preservar os recursos naturais e/ou assegurar a segurança da coletividade. Entre outras razões que conduziram a ocupação territorial brasileira à situação atual, tem-se a insuficiência de dados consistentes para a tomada de decisão dos agentes públicos, fato observado na maioria dos municípios do país.

No sentido de planejar ordenadamente a ocupação, indicando a adequabilidade de áreas às diversas atividades inerentes à sociedade moderna, torna-se necessário um trabalho sistemático de cartografia e hierarquização das áreas de risco. Neste ponto identifica-se nos municípios brasileiros a quase total ausência de dados básicos em escala adequada, como mapas de formações superficiais, substrato rochoso, material inconsolidado e feições de relevo. De modo a suprir parcialmente esta necessidade, pretende-se desenvolver uma metodologia automatizada para geração de informações relevantes para o gerenciamento territorial, com base em dados de sensores remotos. Propõe-se que seja adotada uma abordagem

de síntese das condições do relevo, visando a gestão territorial, através da delimitação de unidades de paisagem geomórficas (UPG).

As unidades de paisagem são entidades constituídas pela associação de elementos naturais distintos, condicionada por características do relevo, solos, vegetação, além de uma componente antrópica, relacionada à ocupação e às intervenções humanas no meio. Na abordagem proposta neste trabalho adotou-se o conceito de unidade de paisagem geomórfica, a qual se fundamenta na identificação da associação das formas de relevo (*landforms*) características de cada unidade. De modo a incorporar elementos de natureza antrópica, foram adicionadas informações das condições da cobertura vegetal, através da análise de imagens de satélite, no que tange à reflectância de faixas do espectro relacionadas à quantidade de clorofila das plantas.

No interior de uma UPG cada atributo descritor do relevo, como altitude, declividade e rugosidade, entre outros, varia lateralmente de maneira distinta dos demais, tanto em relação à tendência direcional como em relação à taxa de variação. A associação dos diversos atributos descritores no interior da UPG caracteriza a estrutura vertical da paisagem. A estrutura horizontal da paisagem, por sua vez, representa a variação lateral de cada UPG. Uma vez que cada atributo pertencente a uma UPG apresenta comportamento lateral independente, a estrutura horizontal desta unidade torna-se complexa, gradativamente perdendo suas características desde seu setor central em direção à periferia, passando a adquirir características pertencentes às outras unidades do entorno.

Atualmente existem métodos diversos para a cartografia das UPGs, por exemplo, por sobreposição de mapas básicos ou aplicação de redes neurais, entre outros. Cada método disponível apresenta resultados diferentes dos demais, em especial quando comparadas técnicas automatizadas com interpretações humanas, muito dependentes da experiência do intérprete. Em todos os casos é tarefa difícil verificar a acurácia dos resultados obtidos. Como os limites das UPGs variam entre os diferentes métodos, a estrutura vertical da paisagem também varia, impedindo comparações diretas entre os resultados.

A área de pesquisa adotada neste estudo (bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui, na região de Curitiba) apresenta características peculiares

do ponto de vista da evolução dos ambientes naturais presentes. São reconhecidos na área dois remanescentes de paleosuperfícies, identificados através da construção de curvas hipsométricas e histograma de frequência altimétrica, englobando diversas unidades de paisagem atuais e pretéritas. Também as formações superficiais presentes, de pedogênese latossólica e/ou húmica, antigas, são relevantes do ponto de vista de caracterização das UPGs.

No sentido de realizar um mapeamento automatizado das UPGs a partir de dados remotos de baixo custo e ampla disponibilidade, cujos resultados permitam quantificar a qualidade (acurácia) do mapeamento, é apresentada na proposta de uma nova metodologia, baseada na análise probabilística multivariada. Tal análise sustenta-se na aplicação da teoria da probabilidade condicional (regra de Bayes), modificada para contemplar o conceito de incerteza da informação, tanto no que diz respeito aos dados de entrada, quanto dos resultados obtidos no mapeamento. Nas ciências geológicas, em especial na prospecção mineral, os resultados obtidos com a aplicação da probabilidade condicional e do princípio da incerteza são consagrados, subsidiando a tomada de decisão em investimentos. O cálculo da ambiguidade da informação obtida, decorrente da incerteza dos dados de entrada, é elemento fundamental para estimativa da confiabilidade dos resultados.

A metodologia aqui apresentada é focada na seleção de atributos descritores do relevo, cuja independência é princípio fundamental para a aplicação das técnicas de probabilidade condicional. Com base na definição *a priori* das unidades desejadas para mapeamento e na análise de regiões características, são avaliados os atributos que distinguem as unidades entre si, conduzindo à definição de modelos conceituais das UPGs. Em cada UPG, nos setores considerados como mais característicos, são coletadas celas amostrais que subsidiam a análise de favorabilidade para a ocorrência desta unidade, baseada no peso que cada evidência, ou seja, que cada atributo descritor do relevo, representa na constituição do modelo probabilístico de ocorrência da UPG.

Os diversos modelos probabilísticos de ocorrência das UPGs, contemplados através de classificação supervisionada, resultam em um mapa das unidades de paisagem geomórfica para a área de pesquisa. Tal mapa é

consistente do ponto de vista do controle da incerteza (confiabilidade) das informações integradas, além de não apresentar viés empírico, já que o algoritmo pesquisa automaticamente o conjunto de atributos descritores do relevo a serem integrados.

Ao fim, em trabalhos de controle de campo, cada uma das UPGs pode ser caracterizada em relação à presença de paleosuperfícies, assim como de tipos de solo e padrões de relevo presentes, caracterizando-a a partir do ponto de vista do meio físico. Também é possível verificar os processos da dinâmica natural atuantes no interior das UPGs, assim como eventuais indicadores de mudanças geoambientais recentes (quaternárias).

2. Estado da arte

2.1. *O que é a paisagem*

Paisagem é um termo usado no cotidiano para descrever a imagem de um determinado local (espaço territorial abrangido pelo olhar), tendo surgido no século XV, durante o Renascimento (MASSOQUIM, 2010; MENDONÇA; VENTURI, 1998), ou antes, como apresenta Troll (1997), sendo empregado a mais de mil anos através da palavra alemã *landschaft* (paisagem) (GUERRA; MARÇAL, 2006).

A origem do termo paisagem ocorreu em escolas distintas, onde os conceitos variam de acordo com as perspectivas de análise, da abordagem e das orientações teórico-metodológicas, desde um prisma estético-descritivo até uma abordagem mais científica.

Os alemães deram ao termo um significado científico, a partir de um conceito geográfico (*landschaft*), que deriva em paisagem natural (*naturlandschaft*) e paisagem cultural (*kulturlandschaft*). Para as línguas românticas o termo deriva do latim *pagus* (país, com sentido de lugar/território), derivando para *paisage* (em espanhol), *paysage* (francês) e *paesaggio* (italiano) (BOLOS, 1992). Ainda para a autora, as línguas germânicas relacionam o termo paisagem com *land*, com significado similar entre os idiomas alemão (*landschaft*), inglês (*landscape*) e holandês (*landschap*) (ROCHA *et al.*, 1997¹, citado por GUERRA; MARÇAL, 2006).

No século XIX o estudo da paisagem passou a seguir uma abordagem descritiva e morfológica, a partir do trabalho de naturalistas que focaram a natureza do ponto de vista de sua fisiologia e funcionalidade. Esta abordagem é seguida até a década de 1920, aproximadamente, passando a uma abordagem mais integradora, em decorrência do surgimento da Teoria Geral dos Sistemas (GUERRA; MARÇAL *op. cit.*).

¹ ROCHA, C. H., SOUZA, M. L. P., MILANO, M. S. Ecologia da paisagem e manejo sustentável dos recursos naturais. 1997.

Atualmente nas ciências naturais trata-se de um termo impreciso, e por isso sendo normalmente complementado por um termo qualificativo, como “paisagem vegetal” ou “paisagem morfológica” (BERTRAND, 1971). Em 1971 a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) declarou que a paisagem é a “estrutura do ecossistema”, enquanto o Conselho Europeu considerou que o meio natural é moldado por fatores sociais e econômicos, tornando-se paisagem quando sob o olhar humano (ROUGERIE; BEROUTCHACHVILI, 1991).

Embora inicialmente fosse tratada como uma entidade subjetiva, a partir da década de 1960 a paisagem passou a ter seu estudo abordado dentro da proposta de uma geografia física global, com os estudos do francês Georges Bertrand, assumindo um caráter científico, ou seja, deixando de ser apenas o que se vê. Para este autor, a paisagem é concebida como uma porção do espaço, que resulta da combinação dinâmica e instável de elementos físicos, biológicos e antrópicos, compondo um conjunto único e indissociável (MARTINELLI; PEDROTTI, 2001; GUERRA; MARÇAL, 2006).

2.2. Paisagem: Visão Sistêmica

A teoria dos sistemas, apresentada em 1968 pelo biólogo Ludwig Von Bertalanffy, constitui-se na mudança do pensamento reducionista para o pensamento holístico, ou sistêmico. Nesta visão, não basta estudar as partes e os processos isoladamente, mas também resolver problemas resultantes da interação das partes (CHRISTOFOLETTI, 2004).

Conceitualmente, no estudo da paisagem é indicada a aplicação do método geossistêmico, apesar das dificuldades, como na questão da escala espacial. Especialmente em escalas regionais os trabalhos sobre o tema aplicam mais uma relação da dinâmica da paisagem do que o estudo do geossistema (SOCTCHAVA, 1979; BERTRAND, 2007). A dificuldade em aplicar o conceito do geossistema é decorrente da premissa de que no interior desta estrutura admite-se existir um contínuo ecológico, fato nem sempre encontrado em todas as escalas de trabalho (MASSOQUIM, 2010). Um geossistema, em qualquer tempo, encontra-se em determinado estado de dinâmica. Deste fato decorre que as mudanças ocorridas ao longo do tempo

dificultam as classificações das estruturas dos geossistemas, uma vez que com o uso da terra as paisagens encontram-se mais fragilizadas, exigindo uma classificação mais complexa (SOCTCHAVA, 1979).

Dentro de uma concepção sistêmica a paisagem é uma porção do espaço caracterizada por um tipo de combinação dinâmica (instável) de elementos geográficos diferenciados (físicos, biológicos e antrópicos), que atuando entre si fazem da paisagem um conjunto geográfico indissociável (BERTRAND, 1968², 1970³, 1978⁴, citado por MARTINELLI; PEDROTTI, 2001).

2.3. *Ecologia da paisagem*

Dentro do estudo das inter-relações entre o ambiente (paisagem e dinâmica dos processos) e a biota, o termo “ecologia da paisagem” foi criado pelo alemão Carl Troll, tendo como noção básica da paisagem a espacialidade, ou seja, a heterogeneidade do espaço onde o homem habita (TROLL, 1971). A ecologia da paisagem é ciência básica para o desenvolvimento, manejo, conservação e planejamento da paisagem, possibilitando avaliá-la sob diversos pontos de vista, em diferentes escalas temporais e espaciais (RISSER, 1987).

Neste ponto surge uma dicotomia que distingue o ecólogo do ecossistema, focado na relação de uma comunidade com o sistema abiótico (relações verticais), do ecólogo da paisagem, mais preocupado em estudar a heterogeneidade espacial (relações horizontais). É no campo de estudo do segundo que este trabalho se enquadra, no que tange o conceito de estrutura da paisagem. O termo “paisagem” leva em conta fatores de intervenção humana, qualidades estéticas e componentes naturais, dentre os quais se destaca a geomorfologia (LUCAS, 1991). A paisagem pode ser considerada como uma área espacialmente heterogênea, devendo ser consideradas sua função, alterações e estrutura (TURNER; GARDNER, 1990). Entende-se então

² BERTRAND, G. Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Révue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, v.39, n.3, 249-272p. 1968.

³ BERTRAND, G. Écologie de l'espace géographique. *Recherches pour une science du paysage*. Société de Biogéographie, *Comptes Rendus*, n.19, 195-205p. 1970.

⁴ BERTRAND, G. Le paysage entre la nature et la société. *Révue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, n.49, 16-26p. 1978.

que o pré-requisito para o estudo da função e das alterações de uma paisagem é a capacidade de quantificar a estrutura da paisagem (MCGARIGAL; MARKS, 1995).

2.4. Estrutura da paisagem

O conceito de estrutura da paisagem foi, em seu desenvolvimento, fortemente determinado por ferramentas computacionais e por métodos de processamento digital de imagens e de sistemas de informações geográficas. No intuito de desenvolver uma avaliação analítica da estrutura da paisagem, desenvolveu-se um conjunto de métodos, designados como medidas da estrutura da paisagem. A importância da caracterização espacial-estrutural da paisagem, para a indicação de condições e mudanças mostra-se também no papel decisivo que as medidas da estrutura da paisagem desempenham no planejamento territorial. Quanto à aplicação prática, o conceito de estrutura da paisagem tem como objetivo complementar pesquisas *in situ*, ou seja, focar perfis no trabalho de campo (LANG; BLASCHKE, 2009).

A paisagem possui uma estrutura composta por três elementos: matriz, corredor e fragmento. Este último é também conhecido como ecótopo, *patch*, biótopo, entre outros. Estes fragmentos são superfícies não lineares, inseridas na matriz e diferentes de seu entorno, variando em tamanho, forma, tipo de heterogeneidade e limites. A matriz representa o elemento com maior conectividade e que ocupa a maior extensão na paisagem, e que por isso tem maior influência no funcionamento dos outros ecossistemas, enquanto os corredores se referem às faixas estreitas (naturais ou antrópicas), diferentes da matriz em ambos os lados (FORMAN; GODRON, 1986; FARINA, 1998; URBAN *et al.*, 1987).

Estruturas da paisagem resultam do fato da paisagem estar dividida em combinações específicas, espacialmente variáveis, de determinadas feições dos diferentes compartimentos. Tais compartimentos são designados como complexos parciais que participam da estrutura da paisagem, como solo, rocha, água, relevo, clima e vida vegetal (LANG; BLASCHKE, 2009).

2.5. Unidades de Paisagem

Unidade de paisagem, como entidade, é reconhecida como o resultado da conjunção de fatores distintos, como a história geológica, morfogênese do relevo, o clima, a dinâmica biológica e a participação da ação humana em sua evolução histórica. Dentro do contexto da cartografia ambiental, o mapeamento das unidades de paisagem é tido como um trabalho de síntese, já que estas se comportam como geossistemas dotados de morfologia, funcionamento e comportamento (BEROUTCHACHVILLI; BERTRAND, 1978; FERREIRA, 1997). É necessário que a cartografia das unidades de paisagem leve em conta a articulação dos diferentes níveis de análise, em conformidade com as ordens de grandeza em que os fenômenos se manifestam, mas também as combinações e contradições que acontecem entre conjuntos espaciais de conteúdos distintos. Tal necessidade somente é conceptível através de um raciocínio de síntese, através de uma cartografia que apresente conjuntos espaciais com identidade peculiar e marcante, que são agrupamentos de lugares caracterizados por diferentes atributos (LACOSTE, 1977). Também o conhecimento lito-geomórfico é relevante, para efetivar a característica de síntese da cartografia das unidades de paisagem, devendo haver o relacionamento da superfície terrestre modelada tanto às rochas quanto às formações superficiais e aos solos que as recobrem (ROSS, 1995⁵, citado por MARTINELLI; PEDROTTI, 2001).

É fundamental, portanto, a individualização das macrounidades paisagísticas, tidas como amplos complexos eminentemente geomorfológicos, caracterizados por coesa origem estrutural, constituição litológica específica e expressiva característica morfoescultural, pedológica e climática (MARTINELLI; PEDROTTI, 2001). Esta base geomorfológica constitui fator fundamental ao imprimir determinadas feições identificadoras para o reconhecimento das grandes categorias da paisagem, podendo ser decomposta em conjuntos espaciais em função das discontinuidades geomorfológicas (complexos de

⁵ ROSS, J.L.S. Os fundamentos da Geografia da natureza. In: ----- (org.). Geografia do Brasil. São Paulo: Edusp, 1995. p. 13-65.

morfoesculturas articulados a complexos de morfoestruturas), topoclimáticas e de vegetação (CASTIGLIONI⁶, 1979; ROSS, 1995⁷, citado por MARTINELLI; PEDROTTI, 2001).

De forma a concentrar a análise de unidades de paisagem nas feições de relevo, desenvolveu-se o conceito de unidades de paisagem geomórficas (UPG). O objetivo deste sistema de classificação foi identificar regiões relativamente homogêneas (unidades), do ponto de vista de morfologia do relevo, para as quais um conjunto único de características pudesse ser desenvolvido, sem a necessidade de verificar a acurácia em todos os pontos (DIETRICH; LIGON, 2008). Este conceito deriva da classificação do relevo sob uma abordagem dominada pela atuação dos processos, ou seja, um quadro dentro do qual os processos geomórficos governam o padrão temporal de mudanças que influenciam na estrutura e na dinâmica do ecossistema (MONTGOMERY, 1999).

2.6. Geomorfologia da paisagem

A geomorfologia despontou como fator importante no estudo da paisagem a partir do conceito germânico de *landschaft*, que possui um significado tanto de território, como também o caráter visual, integrando todos os elementos que compõem a paisagem (CHRISTOFOLETTI, 1990). Na mesma escola destaca-se o trabalho de Siegfried Passarge, definindo em 1920 o que seria a “ciência da paisagem”, como descreve Klimaszewski, (1963⁸, citado por ABREU, 2003). Passarge apresentou novos conceitos e realizou uma análise mais global das formas de relevo, integrando-as em uma visão geográfica da paisagem a partir de um novo método com base na cartografia geomorfológica.

No início do século XX o francês Emanuel De Martonne, em sua obra intitulada *Tratado de Geografia Física Geral*, dissociou o meio físico dos

⁶ CASTIGLIONI, G. B. Geomorfologia. Torino, UTET. 127p. 1979.

⁷ ROSS, J.L.S. Os fundamentos da Geografia da natureza. In: ----- (org.). Geografia do Brasil. São Paulo: Edusp, 1995. p. 13-65.

⁸ KLIMASZEWSKI, M. *Problems of geomorphological mapping*. Varsóvia, Academia Polonesa de Ciências. (Estudo Geográfico. 46). 1963.

aspectos humanos. Este trabalho destacou a geomorfologia em função de seu crescimento em relação aos outros ramos da Geografia Física (MENDONÇA, 2001⁹, citado por GUERRA E MARÇAL, 2006).

Na União Soviética, de forma paralela por se tratar de uma escola cientificamente fechada em relação aos outros países, Doloutchaev definiu em 1912 o “Complexo Natural Territorial”, incluindo os processos físicos, químicos e bióticos, onde o solo aparece como produto da interação entre relevo, clima e vegetação (ROUGERIE; BEROUTCHACHVILI, 1991).

Já na escola anglo-americana, no final do século XIX, aplicava-se uma perspectiva de evolução do relevo no estudo da paisagem, com destaque para os trabalhos de Grove Karl Gilbert (1880) e de William Morris Davis (1899). Davis desenvolveu uma concepção finalista para a interpretação do relevo, considerando que a evolução do relevo tem início, meio e fim, podendo, entretanto, haver processos sucessivos de rejuvenescimentos. Dentre os cientistas influenciados pela visão de Davis estão aqueles dos países de língua inglesa e francesa, além de brasileiros, como Aroldo de Azevedo, Aziz Ab'Saber e Fernando Flávio Marques de Almeida. A grande contribuição de Gilbert para a geomorfologia foi apresentar a noção de equilíbrio da natureza, avançando em relação ao conceito da geomorfologia davisiana, que tratava do conceito de equilíbrio apenas no estudo do perfil longitudinal dos cursos d'água. Nas duas primeiras décadas do século XX teve início uma tendência de aumento das descrições dos elementos físicos da paisagem, com destaque para as formas topográficas, o que aproximou muito o conceito de *landschaft* (alemão) do *Complexo Natural Territorial* (soviético), permitindo estabelecer distinções maiores entre as paisagens naturais e culturais (CHRISTOFOLETTI, 1990).

⁹ MENDONÇA, F. Geografia Física: Ciência Humana? São Paulo, Editora Contexto, 71p. 2001.

2.7. Cartografia geomorfológica e de unidades de paisagem

Representar cartograficamente o relevo de maneira sistemática não é uma tarefa fácil devido à complexidade das informações que devem ser necessariamente relatadas. Desde meados do século XX, em especial após a Segunda Guerra Mundial, a cartografia geomorfológica passou a ser alvo de tentativas de sistematização em muitos países, especialmente na Europa.

Os soviéticos Gerasimov e Mescherikov introduziram os conceitos de morfoestrutura e morfoescultura, conforme concepção de Walther Penck, o que permitiu distinguir a diversidade de formas do relevo e os mais importantes grupos genéticos (ROSS, 2002). As morfoestruturas estariam relacionadas aos grandes conjuntos do relevo (e.g. cadeias de montanhas), enquanto as morfoesculturas se referem às formas de relevo de ordem inferior, como morainas e dunas, formadas sob a ação de fatores exógenos.

Um novo olhar do ponto de vista da aplicação dos mapeamentos geomorfológicos surgiu em 1965, a partir da contribuição de J. Demek em sua obra “Generalização de Mapas Geomorfológicos”. Neste trabalho, Demek definiu três unidades taxonômicas básicas: (1) superfície geneticamente homogênea: menor táxon – e.g. vertentes; (2) táxon intermediário: e.g. colina; e (3) táxon superior: conjunto de formas de relevo semelhantes entre si (GUERRA; MARÇAL, 2006).

Em frente a crescente preocupação com a sistematização das formas de relevo, a União Geomorfológica Internacional estabeleceu, em 1965, os princípios que passaram a nortear a elaboração de cartas geomorfológicas, conforme explica Klimaszewski (1982).

Santos (2003¹⁰, citado por Guerra; Marçal, 2006) e Ross (2002), reúnem o histórico da evolução da cartografia geomorfológica no Brasil, cujas propostas pioneiras datam do século XIX, atribuídas a Aires de Cabral, através de seu livro *Corografia Brasílica ou Relação Histórico-Geográfica do Reino do*

¹⁰ SANTOS, A. G. dos. Proposta de classificação do relevo do Brasil. Relatório de pesquisa de Estágio de Campo II. Departamento de Geografia – UFR, 36p, 2003.

Brasil. Segundo estes autores, até a década de 1940, as propostas de classificação do relevo brasileiro misturavam definições geológicas e geomorfológicas, generalizando as formas de relevo. Após esta fase surge uma preocupação quanto ao emprego de termos eminentemente geomorfológicos, em especial nos trabalhos de Aroldo de Azevedo, em 1945, por sua obra *O planalto brasileiro e o problema da classificação de suas formas de relevo*, mas também por meio de publicações de Affonso Várzea (1942), Fábio de Macedo Soares Guimarães (1943), Antonio Teixeira Guerra (1955). Na década de 1970 Aziz Nacib Ab'Saber se destaca por se basear em conceitos morfoclimáticos, definindo a paisagem brasileira em seis grandes domínios (GUERRA; MARÇAL, 2006).

Atualmente é difundida a metodologia do geógrafo Jurandyr Ross, baseada nos trabalhos de Aziz Ab'Saber aplicada em quase a totalidade dos relatórios e mapas gerados através do Projeto Radam Brasil, bem como nos conceitos de morfoestrutura e morfoescultura. Em trabalho intitulado *Relevo brasileiro: uma nova proposta de classificação*, Ross (1985¹¹, citado por GUERRA; MARÇAL 2006) considera a macrocompartimentação do relevo brasileiro em três táxons: o primeiro eminentemente geomorfológico (planaltos, depressões e planícies); o segundo tenta classificar os planaltos em função de seu caráter estrutural; e o terceiro, que define nominalmente cada unidade morfoescultural.

Quanto às abordagens cartográficas mais detalhadas, nas últimas décadas foram apresentadas diversas propostas metodológicas, com ponto comum em relação às contribuições iniciais dos soviéticos, porém diferenciando as formas de agrupamento das diferentes formas de relevo. Uma proposta metodológica baseada também nos conceitos taxonômicos foi apresentada por Ross, em seu livro *Geomorfologia, Ambiente e Planejamento* (1990), visando o mapeamento geomorfológico em diversas escalas. Neste trabalho são detalhados seis níveis de abordagem, ou táxons, podendo ser

¹¹ ROSS, J. L. S. *Relevo Brasileiro: uma nova proposta de classificação*. Revista Brasileira de Geografia, São Paulo, n. 4, p. 25-39, 1985.

aplicado até a escala de 1:25.000 (microcompartimentação), em níveis crescentes de detalhamento: (1) morfoestrutural; (2) morfoescultural; (3) modelado; (4) conjunto de formas semelhantes; (5) dimensão das formas; e (6) formas lineares do relevo (GUERRA; MARÇAL, 2006).

Outras propostas metodológicas regionais foram desenvolvidas, merecendo destaque o Projeto Radam Brasil, de 1983, cuja experiência desenvolvida caracterizou um marco referencial para os trabalhos de mapeamento no Brasil. Este projeto teve o objetivo de mapear os aspectos geológicos, geomorfológicos, pedológicos, climáticos e de vegetação, visando otimizar o aproveitamento do território, com base em dados de radar na escala 1:250.000. No ano de 1995 foi publicado o *Manual de Mapeamento Geomorfológico*, pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, o qual apresenta a versão metodológica do projeto, distinguindo quatro níveis taxonômicos, do regional para o detalhe: (1) domínios morfoestruturais; (2) regiões geomorfológicas; (3) unidades geomorfológicas; e (4) tipos de modelado (ROSS, 2002).

Também em níveis estaduais foram apresentadas propostas de mapeamento geomorfológico. Em São Paulo foi publicado o mapeamento geomorfológico paulista na escala 1:250.000, usando o conceito taxonômico (ROSS; MOROZ, 1996¹², citados por MINEROPAR, 2006). Para o Rio de Janeiro a metodologia adotada foi norteadada pelos conceitos de morfoestrutura e morfoescultura, assim como dos Sistemas de Relevo, de Ponçano *et al.* (1981¹³, citado por GUERRA; MARÇAL, 2006). Esta metodologia utiliza informações provenientes de material bibliográfico, interpretação de imagens orbitais (LANDSAT TM), fotografias aéreas e cartas topográficas, em escala 1:60.000 e 1:50.000, respectivamente. Como resultados foram identificadas as unidades morfoestruturais, morfoesculturais e os sistemas de relevo do Estado

¹² ROSS, J. L. S. MOROZ, I. C. – Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo.

– FFCH/USP, Revista do Departamento de Geografia. São Paulo, v. 10, p. 20-32, 1996.

¹³ PONÇANO, W. L.; CARNEIRO, C.; BISTRICH, C. A.; ALMEIDA, F. F. M. de; PRANDINI, F. L. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. Monografias do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 5. 1981.

(DANTAS, 2000¹⁴, citado por GUERRA, MARÇAL, 2006). De maneira alternativa foi apresentada a estruturação geomorfológica do Estado do Rio de Janeiro, por meio de uma leitura baseada na aplicação da técnica de desnivelamento altimétrico em bacias de drenagem de até segunda ordem, conforme proposta de Meis *et al.* (1982). Com esta metodologia foram delimitadas feições de degraus escarpados, degraus e/ou serras reafeiçoados, morros, colinas e planícies aluvionais e/ou flúvio-marinhas, cujo arranjo espacial permitiu definir as unidades de relevo, assim como as regiões e domínios morfoestruturais (SILVA, 2002¹⁵, citado por GUERRA; MARÇAL 2006).

Recentemente tornou-se comum a integração de dados altimétricos com imagens orbitais para a realização de estudos geomorfológicos. Trata-se de uma tendência viabilizada pela elevada disponibilidade de dados, muitas vezes gratuitos e com ampla cobertura espacial. Foram apresentadas aplicações práticas da integração entre dados altimétricos do sensor SRTM com imagens Landsat (TM e MMS 5 e 7), destacando como relevante o realce obtidos das feições morfológicas (BATISTA *et al.*, 2005; BOULHOSA; SOUZA FILHO, 2005). Resultados semelhantes foram obtidos por Silva; Amaro (2008), que concluíram que a utilização de dados altimétricos SRTM combinados com imagens de sensores ópticos demonstraram ser uma excelente ferramenta para a caracterização geológica e geomorfológica.

Para o Estado do Paraná foi publicado no ano de 2007, através de uma parceria entre a o Governo do Estado, por meio da empresa Minerais do Paraná SA – Mineropar, e o Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, o *Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná*, na escala de 1:250.000 (MINEROPAR, 2006).

Em suma a geomorfologia pode servir de importante parâmetro para a definição das unidades de paisagem, em especial quando a área expressar

¹⁴ DANTAS, M. E. Mapa geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro. Brasília: CPRM. Escala: 1:250.000, CD-ROM.

¹⁵ SILVA, T.M. A estruturação geomorfológica do Planalto Atlântico do Estado do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Geografia. UFRJ, Tese de Doutorado, 269p. 2002.

prioritariamente a relação do uso da terra com as formas de relevo. Dessa forma a contribuição metodológica do conhecimento geomorfológico passa pela cartografia do relevo, representando formas e processos, através do mapeamento em escalas variadas.

Dimensionando as unidades de paisagens através das unidades de relevo torna-se possível um conhecimento ordenado do uso e ocupação da terra. Neste âmbito *“a aplicação e a escolha da metodologia adequada vão depender da área a ser trabalhada, em razão das metodologias não poderem adequar-se em áreas diversificadas do ponto de vista morfológico, no Brasil”* (GUERRA; MARÇAL, 2006¹⁶). Diagnosticar a situação real em que se encontram os recursos naturais é instrumento necessário para sua preservação, sendo um desafio buscar e adequar às metodologias, entendendo que as unidades de paisagem, quando definidas como espaços operacionais, representam ferramenta útil para estabelecer critérios de planejamento sustentável (GUERRA; MARÇAL, *op cit.*).

2.8. Mapeamento geomorfométrico

A aplicação de dados remotos para mapeamento de aspectos morfométricos da paisagem desenvolveu-se especialmente nas últimas duas décadas, com a difusão dos aplicativos de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e da evolução da capacidade de processamento dos computadores. Em relação às técnicas aplicadas para mapeamento geomórfico sobre dados de sensores remotos, inúmeros trabalhos têm sido publicados.

É indicada a inclusão de dados topográficos, tais como o aspecto (orientação das vertentes), para mapeamento temáticos, em adição às imagens orbitais, uma vez que o relevo influencia fortemente a reflectância espectral (STRAHLER *et al.*, 1978¹⁷, 1980¹⁸, citados por SKIDMORE *et. al*, 1997). Outra

¹⁶ GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. dos S. Geomorfologia Ambiental. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 192p. 2006. p147.

¹⁷ STRAHLER, A.H; LOGAN, T.L.; BRYANT, N.A. Improving forest cover classification accuracy from Landsat by incorporating topographic information. Proc of the 12th international symp on remote sensing of environment, Vol 2. ERIM, Ann Arbor, Michigan, pp927-942. 1978.

opção de uso integrando imagens orbitais a dados topográficos visando o mapeamento em ambiente SIG para gerenciamento sustentável do território sugere a sobreposição de imagens orbitais sobre o modelo digital de elevação - MDE (SKIDMORE *et al.* 1997). Neste trabalho também são mostrados exemplos de integração de dados multi-fonte através da sobreposição de mapas temáticos (imagem classificada) e fotografias aéreas sobre o MDE, bem como a sobreposição de vetores lineares em ortofotos orbitais de alta resolução. Os autores destacam três tipos de imagens de sensores remotos que tem elevado potencial para uso no planejamento sustentável territorial: imagens de alta resolução espacial, hiper-espectrais e de radar.

Atributos topográficos podem ser derivados a partir de um modelo digital de elevação (MDE) para modelar os processos hidrológicos e geomorfológicos, prever a distribuição espacial das propriedades do solo, bem como a posição topográfica de espécies dentro de uma região (BLASZCZYNSKI, 1997¹⁹; GALLANT; WILSON, 2000²⁰; ZEVENBERGEN; THORNE, 1987²¹, citados por KLINGSEISEN *et al.*, 2007).

No Brasil o uso de ambientes SIG integrando técnicas de processamento digital de imagens (PDI) foi usado como instrumento para obter a compartimentação geomorfológica e pedológica em áreas do Brasil Central (LEAL *et al.*, 2003²²; HERMUCHE *et al.* 2002²³; PANQUESTOR *et al.*, 2002²⁴; OLIVEIRA *et al.*, 2005²⁵, BORGES *et al.*, 2005²⁶, citados por BORGES, 2008).

¹⁸ STRAHLER, A.H.; ESTES, J.E.; MAYNARD, P.F.; MERTZ, F.C.; STOW, D.A. Incorporating collateral data in Landsat classification and modelling procedures. Proc of the 14th internatl symp on remote sensing of environment, San Jose, Costa Rica, Vol 2. ERIM, Ann Arbor, Michigan, pp 1009-1026. 1980.

¹⁹ BLASZCZYNSKI, J.S. Landform characterization with geographic information systems. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 63 (2), 183-191p. 1997.

²⁰ GALLANT, J.C., WILSON, J.P. Primary topographic attributes. In: WILSON, J.P., GALLANT, J.C. (Eds.), Terrain Analysis, Principles and Applications. John Wiley & Sons, New York, pp. 51-85. 2000.

²¹ ZEVENBERGEN, L.W., THORNE, C.R. Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surface Processes and Landforms 12, 47-56p. 1987.

²² LEAL, L.R. *et al.* Definição de unidades geomorfológicas a partir de imagens de dados morfológicos na bacia do Rio Grande (BA). Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05-10 abril de 2003, INPE. P.2055-2062.

²³ HERMUCHE, P.M.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO, A.P.F.; MARTINS, E.S. FUCKS, S.D.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; SANTOS, N.B.F.; REATTO, A. Morfometria como

O uso de modelo digital de elevação de alta resolução, derivado de imagem LiDAR (*Light Detection And Ranging*) permitiu a geração de mapas temáticos, tais como relevo sombreado, curvatura plana e índice de rugosidade, a partir dos valores de desvio padrão da altitude do relevo, através de buscas em janela móvel (CAVALLI; MARCHI, 2008). Esta interpretação teve como base os métodos de mapeamento de índice de rugosidade sobre dados de imagem LiDAR, como apresentados por McKean; Roering (2004) e Haneberg *et al.* (2005²⁷, citado por GROHMANN *et al.*, 2009), entre outros.

Entretanto a aplicação de métodos automatizados para cálculos morfométricos apresenta subjetividades, como demonstraram Grohmann *et al.* (2010), que aplicaram seis técnicas para cálculo da rugosidade do relevo, visando avaliar o comportamento dos parâmetros em diferentes escalas espaciais e resolução dos dados. Entre os resultados alcançados, por exemplo, identificaram situações onde o aumento da rugosidade era resultado do aumento da janela de busca de dados, bem como técnicas onde a identificação de feições locais foi favorecida, em detrimento do relevo regional. Destacam, porém, que o cálculo do desvio padrão sobre dados de elevação identificou corretamente as quebras de declividade, bem como detectou o relevo regional. Também o desvio padrão da declividade mostrou os melhores resultados para a análise geomorfológica, através da delimitação de zonas com declividade suave e quebras de declividade.

suporte para elaboração de mapas pedológicos: I. Bacias Hidrográficas Assimétricas. Documentos – Embrapa Cerrados. Planaltina (DF), v.68,p.1-25, 2002.

²⁴ PANQUESTOR, E.K. *et al.* Associação do processamento digital de imagens ao uso de parâmetros morfométricos na definição de unidades de paisagem da Bacia do Rio Corrente-BA. Espaço e geografia: geoprocessamento, Brasília, v.5, n.1, p.87-99, 2002.

²⁵ OLIVEIRA, B.M.L.; RAMOS, V.M.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; BETTIOL, G.M.; GOMES, R.A.T.; MARTINS, E.S. REATTO, A. Avaliação do uso da morfometria como suporte para a elaboração de mapa pedológico na bacia do Ribeirão da Pedreira – DF. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. Anais XII SBSR. São José dos Campos: INPE, 2005. P.3167-3174.

²⁶ BORGES, M.E.S.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; MARTINS, E.S.; GUMARÃES, R.F.; ARCOVERDE, G.F.B. Emprego do processamento digital dos parâmetros morfométricos no mapeamento geomorfológico da bacia do rio Paracatu. Anais do XI Simpósio de Geografia Física Aplicada – 5 a 9 de setembro de 2005. USP. P.2718-2727.

²⁷ HANEBERG, W.C.; CREIGHTON, A.L.; MEDLEY, E.W.; JONAS, D. Use of LiDAR to assess slope hazards at the Lihir Gold Mine, Papua New Guinea: International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, British Columbia, May-June. 2005.

Muitos dos parâmetros do relevo dependem da resolução do modelo digital de elevação usado. Existe substancial literatura relacionada a variogramas, fractais e espectro de potencia para caracterização do terreno, embora os métodos difundidos sejam difíceis de computar e interpretar pela necessidade de pré-processamento e filtragem (HODGSON, 1995²⁸; KIENZLE, 2004²⁹, citados por GUTH, 2006).

A rugosidade é considerada uma variável chave para identificar formas de relevo e determinar os processos que atuam sobre elas, tratada como expressão da variabilidade da elevação de uma superfície topográfica (HOBSON, 1972³⁰, citado por GROHMANN *et al.*, 2009). Vários autores definem a rugosidade em termos da variabilidade dos valores de elevação, normalmente expressa pelo desvio padrão dos valores da altitude dentro de uma janela de busca, ou como o desvio a partir de um plano de tendência (*e.g.* HANEBERG *et al.*, 2005³¹; FRANKEL; DOLAN, 2007³²; EVANS, 1984³³, citados por GROHMANN *et al.*, 2009). A adoção de operadores com janelas móveis se justificou porque o parâmetro morfométrico, desta forma, é calculado para todas as celas de entrada, sem risco de perda de características do terreno (GROHMANN *et al.*, 2009).

O conceito geoestatístico foi introduzido na geomorfometria por Fisher *et al.* (1998³⁴), posteriormente aprofundado por Kyriakidis *et al.* (1999³⁵), Holmes

²⁸ HODGSON, M. E. What cell size does the computed slope/aspect angle represent? *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 61: 513-517. 1995.

²⁹ KIENZLE, S. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. *Transactions in GIS*, 8(1), pp. 83-111. 2004.

³⁰ HOBSON, R. D. Chapter 8 - surface roughness in topography: quantitativ e approach. Pages 221-245 in CHORLEY, R. J., ed. *Spatial analysis in geomorphology*. Harper & Row, New York, New York, USA. 1972.

³¹ HANEBERG, W.C.; CREIGHTON, A.L.; MEDLEY, E.W.; JONAS, D. Use of LiDAR to assess slope hazards at the Lihir Gold Mine, Papua New Guinea: International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, British Columbia, May-June. 2005.

³² FRANKEL, K. L.; DOLAN, J. F. Characterizing arid region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data. *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, 14p. 2007.

³³ EVANS, I.S. Correlation structures and factor analysis in the investigation of data dimensionality: statistical properties of the Wessex land surface, England, International Symposium on Spatial Data Handling, Zurich, 1, pp.98-116. 1984.

³⁴ FISHER P. Improved modeling of elevation error with geostatistics. *Geoinformatica* 2(3): 215-233. 1998.

et al. (2000³⁶) e Oksanen (2006³⁷), todos citados por HENGL *et. al* (2008). Trabalhando com modelo digital do terreno (MDT) derivado de imagens LiDAR, Trevisani *et al.* (2009) avaliaram o relevo usando mapas variográficos e índices de continuidade espacial. Isto permitiu avaliar a reprodução da variabilidade espacial da topografia e caracterizar e comparar diferentes características morfológicas. Vários estudos demonstraram que índices de continuidade estatísticos e espaciais, quando integrados com índices morfométricos e aplicados em MDTs de alta resolução, contribuem no reconhecimento de formas de relevo e permitem caracterizar processos geomórficos em escorregamentos (MCKEAN; ROERING, 2004; GLENN *et al.*, 2006³⁸), nascentes (CAVALLI *et al.*, 2008³⁹), e leques aluviais (*e.g.* STALEY *et al.*, 2006⁴⁰), todos citados por Trevisani *et al.* (2009). Nesta abordagem os mapas variográficos podem ser usados para derivar e calibrar índices morfológicos, capazes de identificar as características mais distintivas da variabilidade de diferentes condições morfológicas, como anisotropia, presença de periodicidade, e a variabilidade espacial calculada em passos (*lags*) específicos, podendo servir de base para classificações automatizadas posteriores.

As assinaturas, adjacências e regras de associação entre as formas de relevo são difusas (*fuzzy*), não apresentando um limite claro. Tal complexidade reside no fato de que as regras que definem a classificação de uma forma de

³⁵ KYRIAKIDIS, P.C.; SHORTRIDGE, A.M.; GOODCHILD, M.F. Geostatistics for conflation and accuracy assessment of digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, **13**(7), 677-707. 1999.

³⁶ HOLMES, K. W.; CHADWICK, O. A.; KYRIAKIDIS, P. C. Error in a USGS 30m digital elevation model and its impact on digital terrain modeling. *Journal of Hydrology*. Vol: 233, Issue: 1-4. 154-173p. 2000.

³⁷ OKSANEN J., SARJAKOSKI T. Uncovering the Statistical and Spatial Characteristics of Fine Toposcale DEM Error. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(4): 345-369. 2006.

³⁸ GLENN N.F.; STREUTKER D.R.; CHADWICK J.; GLENN D.J.; THACKRAY G.D.; DORSCH S.J.; Analysis of Lidar-Derived Topographic Information For Characterizing and Differentiating Landslide Morphology And Activity. *Geomorphology* 73, 131-148 . 2006.

³⁹ CAVALLI, M.; TAROLLI, P.; MARCHI, L.; DALLA FONTANA, G. The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel bed morphology. *Catena* 73: 249-260. 2008.

⁴⁰ STALEY, D.M.; WASKLEWICZ, T.A.; BLASZCZYNSKI, J. S. Surficial patterns of debris flow deposition on alluvial fans in Death Valley, CA using airborne laser s wath mapping. *Geomorphology*, v. 74, p.152- 163. 2006.

relevo variam amplamente entre diferentes elementos. De forma a tentar resolver esta complexidade, Gagrani *et al.* (2006⁴¹, citado por KALRA; PELEG, 2006) propõem um método hierárquico de segmentação, com base em uma estratégia de segmentação do estudo, dividindo o problema (complexo) em unidades menores, cuja solução torna-se mais fácil. Para estes autores, algumas formas de relevo têm características texturais distintivas claras, como dunas e inselbergs, enquanto outras mostram apenas assinaturas digitais (bandas), como corpos d'água e planícies de sal, e outras apenas geometria (meandros), ou dimensões (pântanos e planícies) que as distinguem das demais. Uma vez que a tarefa é difícil, o algoritmo classificador deve ser capaz de avaliar uma ampla variedade de características (textura, cor, tamanho e forma), assim como as regras de associação entre todas as diferentes formas de relevo. Um conjunto muito amplo de características irá confundir o classificador, cuja causa, entre outras, pode decorrer da falta de amostras de treino adequadas para incluir a grande variabilidade dentro de uma mesma classe.

Classificações automatizadas do relevo em ambiente computacional têm sido desenvolvidas na tentativa de superar a subjetividade relativa às interpretações realizadas manualmente, extraindo informações de forma quantitativamente robusta (VAN WESTEN, 1993⁴²; VENTURA; IRVIN, 2000⁴³, citados por KLINGSEISEN *et. al.*, 2007). Embora mais complexa que a identificação visual, alguns autores como Carr (1996), Drägut; Blaschke (2006), e Asselen; Seijmonsbergen (2006), ressaltam que a caracterização quantitativa da morfologia é necessária para análises automatizadas das formas de relevo, inclusive em rotinas de classificação e de reconhecimento de padrões.

⁴¹ GAGRANI, A; GUPTA, L.; RAVINDRAN, B.; DAS, S.; ROYCHOWDHURY, P.; PANCHAL, V.K. A Hierarchical Approach to Landform Classification of Satellite Images Using a Fusion Strategy. ICVGIP: 140-151p. 2006.

⁴² VAN WESTEN, C.J. GISSIZ training package for geographic information systems in slope instability zonation, UNESCO-ITC Project. ITC. Publication No. 15, Enschede. 1993.

⁴³ VENTURA, S.J.; IRVIN, B.J. Automated landform classification methods for soil-landscape studies. In Terrain Analysis: Principles and Applications, WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. (eds). Wiley: New York; 267–294. 2000.

Entretanto, enquanto métodos para extração de parâmetros geomorfométricos (*e.g.* declividade, aspecto) são oferecidos em aplicativos de SIG padrão, mostrando bons resultados, o mapeamento integrado de objetos geomorfométricos, como das unidades de relevo, fundos de vale, cristas ou encostas ainda estão por ser desenvolvidos. Destacam-se as limitações dos aplicativos atuais de SIG, devido à simplicidade dos métodos analíticos, como técnicas de filtragem e sobreposição cartográfica, estrutura restrita dos métodos e ferramentas, se opondo a complexidade necessária à análise geomórfica (SCHMIDT; DIKAU, 1999⁴⁴, citado por KLINGSEISEN *et. al*, 2007).

Em trabalho focado na classificação de macro-formas de relevo em ambiente SIG, Brabyn (1997) identificou erros sistemáticos produzidos em processos automatizados, como a geração de zonas espúrias progressivas na transição de relevos aplainados para montanhosos, falhas na caracterização de vales muito amplos, bem como problemas causados por feições de micro-relevo. Embora tenha conseguido minimizar tais efeitos, o autor conclui que um passo importante no desenvolvimento de processos automatizados de classificação do relevo é a calibragem, relacionada à definição dos atributos a serem avaliados, com frequência medidos diferentemente, com atenção especial aos efeitos de escala e de generalização.

Ainda no campo das limitações inerentes a processos automatizados de classificação de relevo, Gorini (2009), em sua classificação fisiográfica do relevo submarino do golfo do México, conclui que certas classes isoladas de relevo, internas a uma grande província, não foram classificadas corretamente por conta de suas características geomorfológicas. O autor sugere que diferentes assinaturas geométricas devem ser testadas para ampliar a capacidade taxonômica, embora acredite ser difícil que o arranjo espacial das classes *per se* defina todas as províncias fisiográficas. Destaca que o uso de variáveis auxiliares foi essencial, mas também indica que cada província

⁴⁴ SCHMIDT, J., DIKAU, R. Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models: semantics, methods, future needs. In: DIKAU, R.; SAURER, H.: GIS for Earth Surface Systems: Analysis and Modelling of the Natural Environment, Berlin, Stuttgart: Borntraeger: 153-173p. 1999.

fisiográfica pode ter o seu próprio conjunto de atributos descritores, que deve ser investigado para melhorar a eficácia do método.

Para Hoffmann *et al.* (2000) existem dois problemas principais que limitam a interpretação automatizada de dados remotos: (1) a dificuldade de classificar dados de alta resolução, onde cada cela não é relacionada integralmente a um objeto ou área, mas a componentes destes; (2) a análise baseada em celas individuais pode ser inválida para certos ambientes e objetivos. Os autores concluem que o método de classificação ora utilizado pode ser usado para diferentes objetivos, o que inclui a geração de novos formatos de dados.

Uma característica comum aos processos automatizados de análise do relevo é que os resultados frequentemente mostram um conjunto de classes sem coerência espacial. Isto ocorre porque há uma sobreposição entre diferentes classes tanto no espaço geográfico, como em relação aos atributos que caracterizam estas classes (ROMSTAD, 2001). Para minimizar estes efeitos o autor propõe um procedimento baseado na generalização (fusão contextual) antes da classificação, através do emprego de uma classificação contínua (*fuzzy*). O método permitiu uma melhor avaliação das variações espaciais dos atributos dentro das classes e nas zonas de transição entre elas. Concluiu que o potencial da fusão contextual ainda pode ser aprofundado, pois no trabalho citado os valores dos atributos foram calculados apenas pela média do valor das células individuais. Sugere que trabalhos futuros utilizem uma abordagem mais abrangente, calculando os valores dos atributos para cada unidade de relevo com base em sua forma geral, a topografia interna e no contexto do terreno, por exemplo, usando parâmetros como a razão comprimento/largura, comprimento e direção do declive, razão do comprimento da vertente/elevação, e assim por diante. Essa abordagem mais detalhada pode resultar, segundo o autor, em classificações com mais nuances, refletindo não só os processos físicos em nível de cela, mas também em nível de toda a unidade de relevo.

3. Caracterização do problema

Fato comum aos trabalhos voltados à interpretação geomórfica por meio de procedimentos baseados em inteligência artificial é o destaque pelos autores à limitação dos resultados obtidos. Tal limitação é decorrente de dois fatores principais, um mais simples, de origem tecnológica e decorrente do dimensionamento e resolução dos dados de entrada. Mais difícil de ser resolvida quando comparadas à experiência de intérpretes humanos na tomada de decisão, a limitação de percepção dos sistemas automatizados, comumente tornam delicada a aplicação dos resultados obtidos, uma vez que os limites entre diferentes compartimentos nem sempre obedecem a uma concepção empírica usada pelos cientistas e por vezes geram resultados espúrios ou com elevada incerteza.

Conforme descreveram Brabyn (1997), Schmidt ; Dikau (1999⁴⁵, citado por KLINGSEISEN *et. al*, 2007), Grohmann *et al.* (2010), variações quanto aos dados de entrada devem ser testados, a fim de reduzir a geração de feições espúrias, bem como de evitar a confusão entre classes diferentes nos resultados das classificações automatizadas. Tal observação também aparece nos trabalhos de Hodgson (1995⁴⁶) e Kienzle (2004⁴⁷), ambos citados por GUTH (2006), os quais afirmam que os métodos difundidos atualmente para aplicação de procedimentos matemáticos (*e. g.* variogramas e fractais) são de difícil aplicação devido à necessidade de pré-processamento e de filtragens. Também no sentido de atender à necessidade prévia de calibração dados de entrada para processos automatizados, Trevisani *et al.* (2009) afirmam que a calibração das características morfológicas devem servir de base para classificações automatizadas posteriores.

⁴⁵ SCHMIDT, J., DIKAU, R. Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models: semantics, methods, future needs. In: DIKAU, R.; SAURER, H.: GIS for Earth Surface Systems: Analysis and Modelling of the Natural Environment, Berlin, Stuttgart: Borntraeger: 153-173p. 1999.

⁴⁶ HODGSON, M. E. What cell size does the computed slope/aspect angle represent? Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 61: 513-517. 1995.

⁴⁷ KIENZLE, S. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. Transactions in GIS, 8(1), pp. 83-111. 2004.

Em sua abordagem hierárquica para classificação de formas de relevo, Gagrani *et al.* (2006⁴⁸, citados por KALRA; PELEG, 2006) conseguiram considerar uma ampla gama de classes, com base em imagens de satélite. Os resultados apresentados mostraram que o método foi eficaz para diferenciar corretamente as maiores formas de relevo. Concluem que a performance do sistema desenvolvido ainda tem de ser analisada para as feições mais detalhadas, em decorrência de sua complexidade. Como continuidade da linha de pesquisa por eles desenvolvida, trabalhos futuros devem expandir o sistema para avaliar um conjunto maior de formas de relevo, por exemplo, como método para distinção entre diferentes tipos de dunas.

Outras limitações encontradas em tentativas de automatização dizem respeito à particularidades do relevo, como destaca Gorini (2009), que verificou que remanescentes menores, internos a grandes províncias morfológicas, podem não ser classificados adequadamente. Também a análise baseada em células individuais pode ser inválida para determinados ambientes ou objetivos, pois estas estão relacionadas a componentes dos objetos ou áreas e não a esses integralmente (HOFFMANN *et al.*, 2000). Nesta linha Romstad (2001) afirma que a falta de coerência espacial na classificação, resultado comum nos processos automatizados, se deve à sobreposição entre diferentes classes, decorrentes dos atributos que as caracterizam.

O QUADRO 1 apresenta uma síntese das principais limitações encontradas nas técnicas atuais de classificações automatizadas de formas de relevo.

⁴⁸ GAGRANI, A; GUPTA, L.; RAVINDRAN, B.; DAS, S.; ROYCHOWDHURY, P.; PANCHAL, V.K. A Hierarchical Approach to Landform Classification of Satellite Images Using a Fusion Strategy. ICVGIP: 140-151p. 2006.

QUADRO 1. Principais limitações encontradas nas classificações automatizadas de formas de relevo

AUTORES	ATRIBUTOS	OBJETIVOS	LIMITAÇÕES ENCONTRADAS
GROHMANN <i>et al.</i> (2010)	Rugosidade do relevo	Avaliar o comportamento dos parâmetros em diferentes escalas e resolução dos dados.	Variação dos resultados em função do tamanho da janela de busca. Resultados variados para diferentes escalas das feições.
GAGRANI <i>et al.</i> (2006 ⁴⁹ , citados por KALRA; PELEG, 2006)	Imagens de satélite	Método hierárquico para classificação de formas de relevo.	Necessidade de incluir amplo conjunto de características tende a confundir o classificador.
SCHMIDT; DIKAU (1999 ⁵⁰ , citados por KLINGSEISEN <i>et al.</i> , 2007)	Modelo digital de elevação	Extração de atributos morfométricos.	Simplicidade dos métodos analíticos dos aplicativos SIG.
BRABYN (1997)	Modelo digital de elevação	Classificação de macro formas de relevo.	Erros sistemáticos (geração de zonas espúrias entre diferentes compartimentos; falha na caracterização de vales amplos; erros decorrentes de feições de micro-relevo).
GORINI (2009)	Modelo digital do fundo oceânico.	Classificação fisiográfica.	Classes isoladas de relevo dentro de grandes províncias não foram classificadas.
ROMSTAD (2001)	Modelo digital de elevação.	Método para melhorar resultados de classificações automatizadas do relevo.	Resultados frequentemente não mostram coerência espacial entre as classes mapeadas.

⁴⁹ GAGRANI, A; GUPTA, L.; RAVINDRAN, B.; DAS, S.; ROYCHOWDHURY, P.; PANCHAL, V.K. A Hierarchical Approach to Landform Classification of Satellite Images Using a Fusion Strategy. ICVGIP: 140-151p. 2006.

⁵⁰ SCHMIDT, J., DIKAU, R. Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models: semantics, methods, future needs. In: DIKAU, R.; SAURER, H.: GIS for Earth Surface Systems: Analysis and Modelling of the Natural Environment, Berlin, Stuttgart: Borntraeger: 153-173p. 1999.

3.1. Mudanças ambientais

Do ponto de vista da cartografia de indicadores de mudanças ambientais, no hemisfério Sul, os estudos são raros, quando comparados ao hemisfério Norte. O estudo de formações superficiais como indicadoras de mudanças ambientais, teve desenvolvimento importante na década de 60 e 70, tendo retornado ao interesse da comunidade científica no final do século passado, como mostrou M. Widdowson (1997), no livro *"Paleosurfaces: recognition, reconstruction and palaeoenvironmental Interpretation"*. No Brasil, apesar da relevância e atualidade do tema, poucos autores da área de geociências têm se dedicado ao assunto. Não obstante, as geociências têm contribuições fundamentais a fazer sobre as rápidas alterações ambientais globais que atualmente preocupam sobremaneira governos e instituições do mundo todo. Recentemente foi criado no Canadá, por intermédio da *International Union of Geological Sciences* um grupo de trabalho denominado *Geoindicators Working Group* com a finalidade de preencher uma lacuna importante nos estudos, então em desenvolvimento, sobre "indicadores" para mudanças ambientais no qual seriam enfocados "indicadores" dos sistemas ambientais suportados por parâmetros geológicos ou geoambientais (BERGER, 1996), denominados "geoindicadores".

Neste sentido a caracterização e a cartografia das Unidades de Paisagem Geomórficas (UPGs) são de suma importância no que tange o estudo da evolução da paisagem, pois a avaliação das geoformas e dos processos do modelado permite compreender o significado destes elementos na dinâmica do relevo atual, e sua relação como os processos e formas pretéritas.

4. Objetivos

Através da integração de dados de sensores remotos, derivados do processamento do modelo digital de elevação do terreno e de imagens orbitais multi-espectrais, e fazendo uso de técnicas probabilísticas multivariadas, o objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma nova metodologia para a cartografia de Unidades de Paisagem Geomórficas, caracterizando nestas UPGs os processos atuantes e suas relações com a evolução recente da paisagem.

As etapas intermediárias, que visam atender à meta principal, conduzem a objetivos específicos relativos aos resultados dos diversos procedimentos empregados.

O processamento dos dados integrados na pesquisa resultará na geração de mapas temáticos variados, tais como mapas hipsométrico, de declividade, forma das encostas, angulosidade, dimensão fractal, densidade, rugosidade, anisotropia, direção de anisotropia de relevo, índice de stress da vegetação e índice de umidade.

Destaca-se o desenvolvimento de uma nova metodologia, inédita, para a geração de índices geomorfométricos, baseada na análise da variância direcional de dados altimétricos. Esta nova metodologia apresenta-se como alternativa às técnicas já consagradas, porém avançando em termos de praticidade, já que os diversos índices são calculados simultaneamente em uma única etapa. Outro avanço diz respeito à independência da escala de análise dos novos índices geomorfométricos. De forma similar às técnicas empregadas na análise morfométrica em fotografias aéreas, os novos índices geomorfométricos aqui apresentados podem ser aplicados nas mais diversas escalas. São derivados desta nova técnica os índices de rugosidade (IRR), de anisotropia (IAR) e direção de anisotropia, de densidade (IDR) de angulosidade do relevo (IAN), assim como a dimensão fractal.

A comparação dos atributos descritores do relevo empregados durante a etapa de análise exploratória (análise de matriz de correlação) evidenciará a relação de dependência/independência entre eles, fornecendo assim

importante critério para a seleção dos dados a serem empregados na análise de favorabilidade para a ocorrência de cada UPG.

Outra meta prevista é a geração de modelos conceituais para as UPGs avaliadas, com base na seleção de atributos necessários ou suficientes, de acordo com a teoria de probabilidade condicional (regra de Bayes). A definição dos indicadores necessários/suficientes conduzirá ao desenvolvimento do conceito de assinatura geomórfica, associada aos modelos conceituais, compatível com o conceito de assinatura aplicado ao processamento de imagens digitais em sensoriamento remoto.

Por fim, através de técnicas de análise de favorabilidade (probabilidade condicional modificada para a inclusão da incerteza da informação) serão gerados modelos probabilísticos para a ocorrência de cada UPG, resultando em um mapa das Unidades de Paisagem Geomórficas para a área objeto de pesquisa, contendo a delimitação das diferentes UPGs, bem como sua caracterização no que diz respeito à forma do relevo e aos processos atuantes.

Espera-se que a nova metodologia aqui apresentada seja passível de replicação em outras áreas.

5. Objeto de pesquisa

O objeto de investigação desta tese, de uma forma mais geral, é a unidade de paisagem geomórfica. Trata-se de um conceito relativamente novo, situado diante da demanda existente pelo estabelecimento de unidades territoriais de planejamento, gestão e monitoramento tanto ambiental, como de riscos e de ocupação. Para que esta demanda seja atendida, ocorre a necessidade de seu reconhecimento e delimitação, ou seja, mapeamento. O mapeamento destas unidades deve ser a expressão visível de um conjunto de fatores internos, do maciço rochoso e solos, de agentes externos e da história evolutiva. Esta nova demanda por informação territorial se depara com uma oferta de dados digitais básicos georreferenciados e com um forte aparato de algoritmos para processamento, com um forte potencial para o mapeamento das unidades de território.

Entretanto as unidades de paisagem geomórfica, embora apresentem características próprias de relevo, não são apenas uma conjunção de faixas de variação dos diversos atributos espacialmente variáveis. Neste caso o simples cruzamento de mapas definiriam conjuntos de celas do relevo que pertenceriam a classes de terrenos.

O que se visualiza ao propor uma metodologia é que uma unidade de paisagem geomórfica é uma entidade natural com um campo próprio de variação, ou seja, de valores médios e variância, independentemente das faixas vizinhas, podendo extrapolar os valores de diferentes faixas. Assim, um certo valor de variável V_i , obtido em um ponto $X_i Y_i$, que extrapola o valor do campo próprio da UPG, não implica que a UPG não o inclua, mas sim que há uma probabilidade maior ou menor, dependendo das outras variáveis, de que o ponto pertença ou não ao campo próprio da UPG.

Diversos passos metodológicos são considerados:

1. O primeiro, considerando então que as UPGs constituem campos próprios de variação de diferentes atributos, responde à necessidade de usar os dados básicos para definir propriedades espaciais variáveis. Por exemplo, a partir do dado altimétrico, define-se como uma propriedade variável, desde as mais simples,

como a “altitude” e a “declividade”, até mais complexas, como a “convexidade da encosta”, a “orientação da face da encosta”, a “tropia”, etc.;

2. O segundo passo metodológico é a definição de quais propriedades são próprias das UPGs que se deseja mapear; este passo pode ser resolvido de várias formas, como por exemplo: (1) solicitando a um algoritmo de classificação ou agrupamento que organize as celas por grupos com menor variância interna e maior variância externa; ou (2) adotando a classificação de unidades de paisagem pré-existentes, tanto na área de pesquisa como nas adjacências; ou (3) informando pontos amostrais (de campo ou de áreas em dados de sensores remotos) que correspondem a uma e outra UPG, esta última opção adotada neste trabalho;
3. O terceiro passo é a aplicação de um algoritmo que determine o poder de cada variável espacial na identificação de pertinência ou exclusão de uma unidade; podem ser usados algoritmos estatísticos (análise discriminante) ou probabilísticos (regra de Bayes, função *belief*, redes neurais, etc);
4. O quarto passo é a aplicação dos pesos de poder das variáveis para inferir a pertinência ou não a cada uma das UPGs. De posse dos valores de probabilidade, ou fatores, é necessário verificar a qual UPG foi atribuída maior probabilidade de pertinência.
5. Feita a classificação e sua disposição em mapa, resta investigar e esclarecer o significado genético e evolutivo de cada unidade, validando ou não o mapa resultante. Adicionalmente, torna-se importante identificar o seu significado do ponto de vista ambiental e de gestão territorial.

Desta forma o principal objeto desta investigação se delimita a como proceder para alcançar os melhores resultados. Entretanto, como toda a inovação metodológica exige ser testada, incluiu-se como o objeto de aplicação experimental uma área que inclui duas bacias hidrográficas no estado do Paraná, próximo a Curitiba.

De modo a testar a nova metodologia proposta para classificação automatizada das UPGs optou-se por adotar como objeto de pesquisa experimental, a entidade bacia hidrográfica. Tal escolha se justifica uma vez que a bacia hidrográfica é aceita internacionalmente como unidade de planejamento, constituindo um sistema natural bem delimitado geograficamente, onde os fenômenos e interações podem ser integrados. As bacias hidrográficas constituem unidades espaciais de fácil reconhecimento e caracterização, considerando que não há qualquer área de terra, por menor que seja, que não se integre a uma bacia hidrográfica.

Foram adotadas para estudo as bacias hidrográficas dos rios Barigui e Passaúna (mostradas na FIGURA 1), ambas afluentes da margem direita do rio Iguaçu, na região oeste de Curitiba, em decorrência de suas características morfoestruturais e geopedológicas.

A área escolhida foi abordada de forma não sistemática por Bigarella *et al.* (1965), Bigarella; Becker (1975), Soares; Landim (1976), Riffel (2005) e Soares; Riffel (2006), entre outros, e contém remanescentes de duas paleosuperfícies e uma grande diversidade de unidades de paisagens atuais e prévias, com importantes relictos geomórficos e formações superficiais latossólicas e húmicas antigas.

A região inclui APAs (Áreas de Proteção Ambiental), na região dos Mananciais da Serra, importante reservatório hídrico para o abastecimento da capital paranaense, representando um sítio de alta fragilidade ambiental, em zona de transição entre a Floresta com Araucária e Floresta Atlântica.

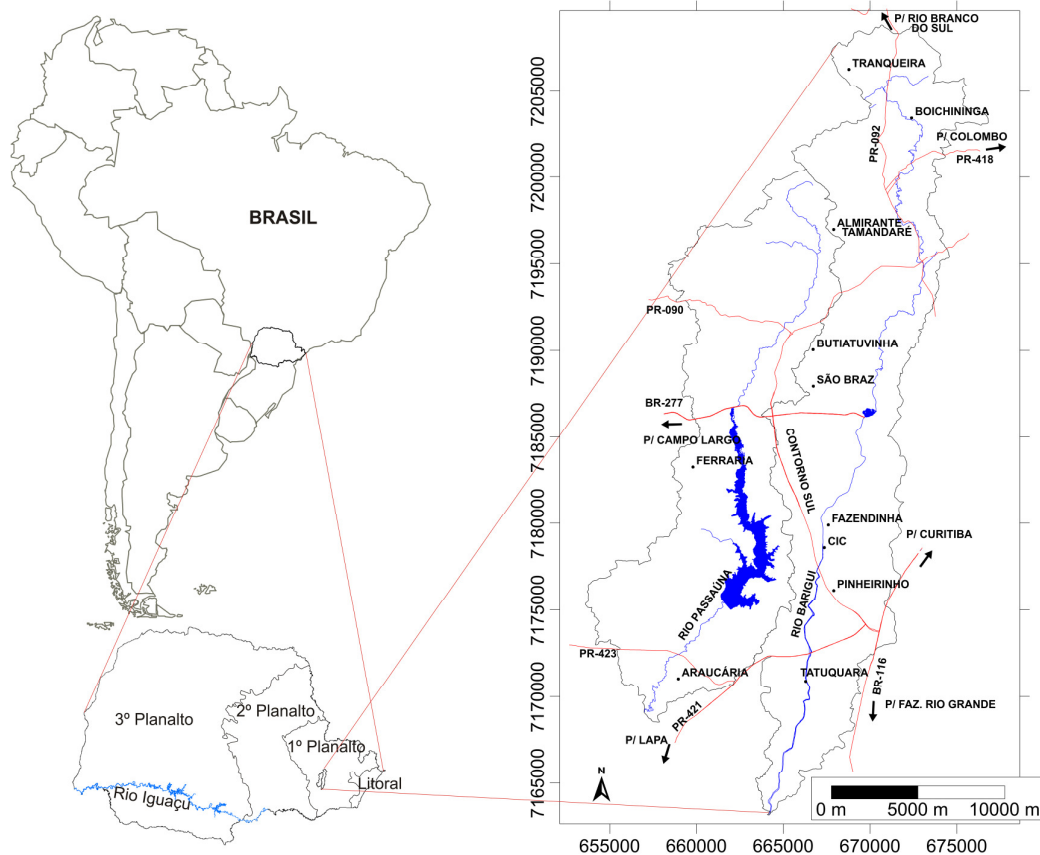


FIGURA 1. Localização da área de estudo. Bacias hidrográficas dos rios Barigui e Passaúna.

5.1. Contexto geológico das bacias do Passaúna e Barigui

A Bacia hidrográfica do Alto Iguaçu, onde está localizada a cidade de Curitiba, está inserida em um contexto geológico, estrutural e geomorfológico bastante heterogêneo, conforme observado no mapa litológico (FIGURA 2). A leste ocorrem maciços graníticos alcalinos, mais resistentes ao intemperismo que os demais tipos litológicos e encaixados em rochas gnássico-migmatíticas do Complexo Atuba, que representa o embasamento regional (SIGA JR *et al.* 1995).

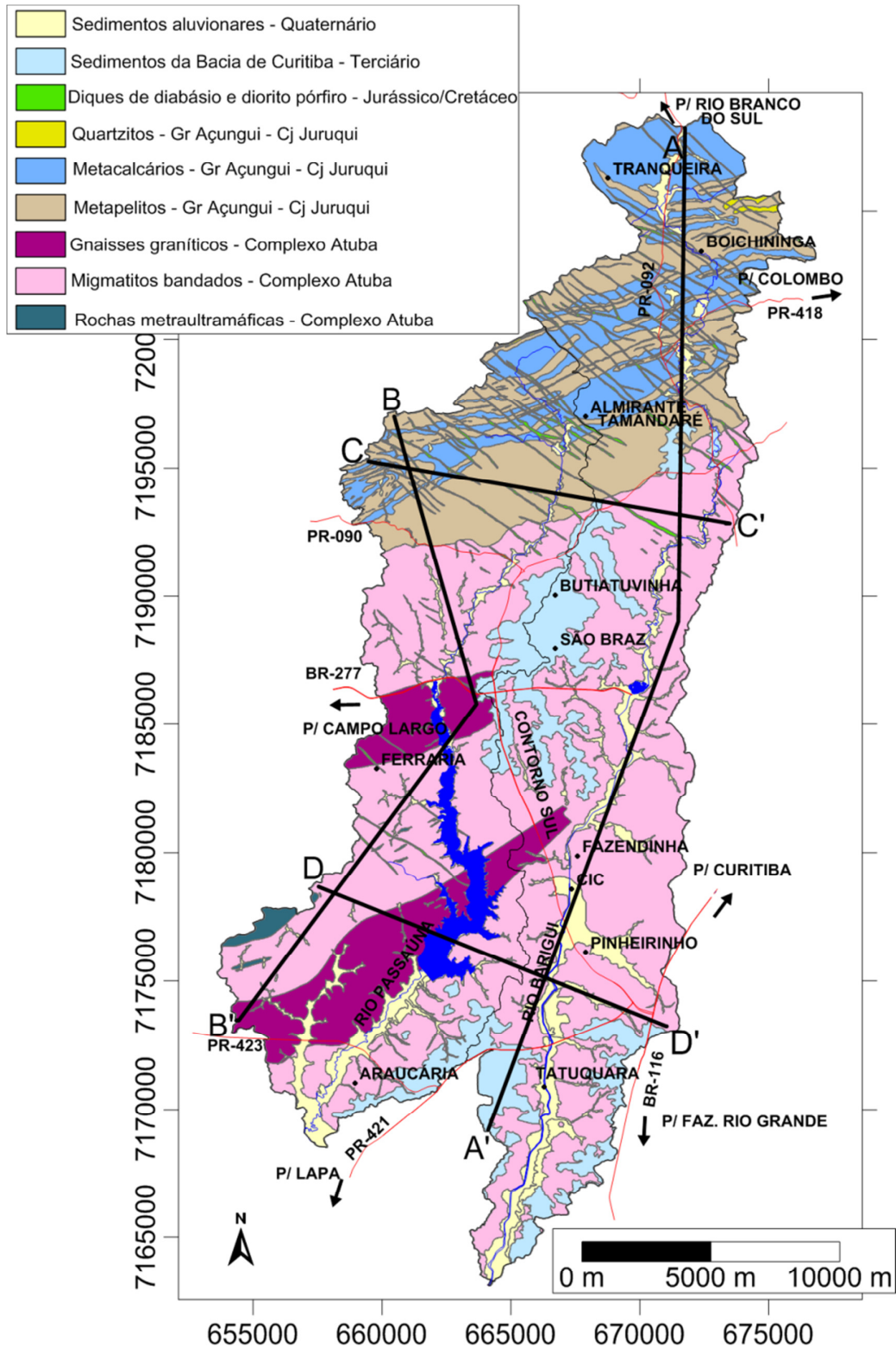


FIGURA 2. Mapa litológico das bacias dos rios Passaúna (esquerda) e Barigui (direita) (AGUASPARANÁ, 2011), indicando a projeção dos perfis geológicos simplificados (FIGURA 57).

A nordeste são encontradas rochas metassedimentares dobradas, normalmente formando espigões e cristas alongadas de quartzito, intercaladas a filitos, orientados na direção nordeste-sudoeste. Nas porções de vale predominam rochas meta-calcárias, com presença comum de feições cársticas.

No extremo oeste a bacia do Iguaçu é limitada pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná, que marcam a transição entre o Primeiro e o Segundo Planalto Paranaense (MAACK, 1968).

Sobre o embasamento (Complexo Atuba) na porção centro-nordeste da área ocorrem remanescentes da Bacia Sedimentar de Curitiba, especialmente nos interflúvios. Em toda a extensão compreendida pela bacia hidrográfica do Alto-Iguaçu são encontrados depósitos aluvionares recentes ao longo das principais drenagens.

A porção central da área de estudo, incluindo parte do município de Curitiba, encontra-se localizada no Primeiro Planalto Paranaense (Planalto de Curitiba), composto por diversas unidades litoestratigráficas agrupadas em dois compartimentos principais: embasamento pré-cambriano/eopaleozóico e Bacia Sedimentar de Curitiba - BSC (SALAMUNI *et al.* 2004), além dos depósitos aluvionares de idade do Quaternário. As rochas do embasamento foram formadas no Paleoproterozóico e rejuvenescidas durante Meso/Neoproterozóico e Eopaleozóico. Ocorrem principalmente gnaisses e granitóides, em parte migmatizados, agrupados no Complexo Atuba (SIGA JR. *et al.* 1995⁵¹, citado por SALAMUNI *op. cit.*), mas também xistos, quartzitos e anfibolitos. Destaca-se na geologia da região a presença de enxame de diques de diabásio, dioritos e dioritos pórfiros, de idade Juro-Cretácea, alinhados preferencialmente na direção noroeste (MARINI *et al.* 1967).

Na área de estudo o Grupo Açungui (Proterozóico Superior) é representado pela Formação Capiu (a norte), que representa todos os metassedimentos que ocorrem na unidade, a sul da Zona de Falha da

⁵¹ SIGA JÚNIOR, O.; BASEI, M. A. S.; REIS NETO, J. M.; MACHIAVELLI, A.; HARARA, O. M. O Complexo Atuba: um cinturão Paleoproterozóico intensamente retrabalhado no Neoproterozóico. Boletim do Instituto de Geociências, São Paulo, v. 26, 69-98p. 1995.

Lancinha, compreendendo três conjuntos litológicos distintos (Juruqui, Rio Branco e Morro Grande – FIORI, 1992). A segmentação da Formação Capiru em conjuntos litológicos foi realizada com base tipos e associações de litologias, estruturas sedimentares, características estruturais, aspectos morfológicos e na presença de falhas de cavalgamento, que quase sempre limitam os diferentes conjuntos. O Conjunto Juruqui, aflorante na área de estudo, é composto por filitos avermelhados, com intercalações não muito frequentes de quartzitos. O Conjunto Rio Branco engloba mármore e/ou metacalcários e intercalações de filitos e quartzitos, enquanto o Conjunto Morro Grande é caracterizado por alternar camadas de quartzitos, filitos e mármore. A deformação do Grupo Açungui é heterogênea, sendo distintos três sistemas deformacionais que atuaram sobre estas rochas, com estruturas sem desenvolvimento penetrativo (ocorrendo localizadamente) ora associadas a estruturas maiores (falhas), ora como anomalias do desenvolvimento estrutural do Grupo Açungui. Estes sistemas deformacionais são assim denominados, do mais antigo para o mais recente: Sistema de Cavalgamentos Açungui, Sistema de Dobramentos Apiaí e Sistema de Transcorrência da Lancinha.

Em relação à Bacia Sedimentar de Curitiba, esta corresponde às formações Guabirotuba e Tinguís, assentadas sobre o embasamento por contato discordante erosivo. De idade oligo-miocênica (SALAMUNI, 1998), a Formação Guabirotuba alcança até 80m de espessura: mostra intercalações de lama e argila, em camadas essencialmente arcoseanas, com areias e depósitos rudáceos em sua porção basal (BIGARELLA; SALAMUNI, 1962; SALAMUNI *et al.*, 1999).

Acima desta camada, a Formação Tinguís, de idade pleistocênica-holocênica é composta por sedimentos retrabalhados da Formação Guabirotuba. Salamuni *et al.* (1998) afirmam que a calha da bacia constitui uma depressão rasa e alongada na direção NE-SW, originada por controle estrutural através de falhas antigas do embasamento, posteriormente reativadas durante o Terciário Inferior. Salamuni *et al.* (1997) calcularam através de uma superfície de tendência baseada em dados de poços, que a calha média da BSC se encontra em aproximadamente 870m acima do nível do mar.

Embora não segmente a área de estudo, estruturalmente o principal elemento regional é a Zona de Falha da Lancinha (ZFL), alinhada na direção nordeste-sudoeste, segmentando as rochas metassedimentares do Grupo Açungui, além dos complexos Setuva e Gnáissico-Migmatítico Atuba (SIGA JR *et al.*, 1995). A ZFL está associada ao desenvolvimento do terceiro sistema deformacional que afeta o Grupo Açungui (FIORI, 1992), caracterizado pela ocorrência de grandes falhas transcorrentes (principais) associadas a diversas estruturas secundárias (falhas sintéticas e antitéticas), com geometria e disposição espacial previsíveis dentro do modelo de cisalhamento simples.

5.2. Contexto geomorfológico das bacias do Passaúna e Barigui

Do ponto de vista da evolução geotectônica e sua relação com a geomorfologia, a Serra do Mar, a leste da área de estudo, emergiu durante o Cretáceo Superior, representando atualmente uma importante barreira geoambiental que separa a planície costeira do Primeiro Planalto Paranaense. Com a erosão associada ao soerguimento, parte do suprimento sedimentar foi transportada para o interior do continente, alojando-se no Grupo Bauru, enquanto outra parte foi depositada na Bacia de Santos, antes do soerguimento total da Serra do Mar (ALMEIDA, 1976). No Cenozóico Superior finalizaram-se os importantes períodos de sedimentação e teve início uma fase de acentuada erosão e de formação da superfície atual (MAACK, 1947). Com alterações do clima, passando de clima úmido para semi-árido a árido, a vegetação ficou restrita a refúgios, o que expôs paleossolos e facilitou a erosão do relevo. Nesta nova condição as chuvas torrenciais foram responsáveis pela deposição do tipo *playa-lake* associado a canais anastomosados, depositando assim a Formação Guabirotuba, preenchendo a Bacia Sedimentar de Curitiba (BIGARELA; SALAMUNI, 1962).

Muratori; Rocha (1988) dividem a bacia do Alto Iguaçu em três unidades geomorfológicas: (1) Planalto de Curitiba; (2) região do Altíssimo Iguaçu; e (3) planície do rio Iguaçu. A bacia do Alto Iguaçu é descrita como tendo feições geomórficas de áreas com baixa taxa de erosão, o que favorece a preservação das paisagens pretéritas, sendo uma zona de eversão (destruição) pela

denudação do Terciário e Pleistoceno, o que resultou em extensas várzeas e planícies suavemente onduladas (MAACK, 1947).

Dois compartimentos morfoestruturais foram descritos por Salamuni *et al.* (1997) para a BSC, com limite junto à confluência com o rio Barigui, evidenciados pelo represamento do rio Iguaçu, indicando basculamento tectônico. Desta condição resultou a característica meandrante do sistema fluvial na porção oriental da bacia hidrográfica.

O Planalto de Curitiba mostra-se colinoso, com ondulações suaves entre 880 e 980m, intermeadas por amplas planícies de inundação. Os talwegues são normalmente encaixados em fraturas e grande parte das colinas mostram processo de dissecação por talwegues menores nas encostas (CANALI; MURATORI, 1981). Pedimentos no interior e nos arredores da BSC são facilmente reconhecidos em modelos digitais de elevação, assim como os traços principais da morfologia (SALAMUNI *et al.* 2004).

No compartimento da Bacia Sedimentar de Curitiba as ombreiras apresentam altitudes médias entre 890 e 900m, com extremo de cerca de 1140m a leste e sudeste, junto as vertentes ocidentais da Serra do Mar, o que configura um alto estrutural. Conforme mostra Salamuni (1998), o mapa morfoestrutural do embasamento da BSC não mostra correspondência com o traçado atual do rio Iguaçu. Existem dois altos topográficos margeando a depressão da BSC, sendo o primeiro representado pelos contrafortes ocidentais do maciço da Serra do Mar, onde as cristas são alinhadas na direção norte-noroeste/sul-sudeste, com altitudes entre 1.100 e 1.200m, com extremos de até 1.800m. Nesta região as escarpas abruptas mostram feições de falha, sendo em grande parte dissecadas. No outro extremo, a oeste-noroeste da BSC, o relevo é sustentado pelos meta-sedimentos do Grupo Açungui, onde as altitudes médias giram em torno de 950m, com máximo de 1.100m. Cristas alongadas na direção nordeste-sudoeste e noroeste-sudeste são as feições marcantes de relevo nesta região. Quanto aos vales que intermeiam as cristas, estes se referem normalmente a sistemas de falhas transcorrentes quando na direção NE-SW, e a presença de diques de rochas básicas.

No domínio da Formação Guabirotuba o relevo mostra colinas alongadas, paralelamente aos grandes vales, enquanto em zonas de afloramento do embasamento as colinas são arredondadas. Através da dissecação da bacia ocorrem planícies de inundação de larguras variadas, preenchidas por depósitos fluviais recentes. Os terrenos aplainados no interior da depressão, suavemente inclinados para sul-sudoeste, mostram-se sulcados pelos talwegues formadores da drenagem principal. Outra feição importante na BSC é a presença de um baixo estrutural local, evidenciado por uma depressão topográfica no centro da bacia (SALAMUNI *et al.* 2004). Ainda neste trabalho, os autores classificaram a região em cinco domínios morfoestruturais, assim denominados: (1) Sistema de planície ou terrenos aluvionares; (2) Sistema de colinas de topo alongado; (3) Sistema de colinas com topo plano; (4) Sistema de montanha; e (5) Sistema de morros.

Localmente a BSC mostra-se menos tectonizada e mais plana que as regiões circunvizinhas (maciço da Serra do Mar e metassedimentos do Grupo Açungui). Entretanto, através da análise hipsométrica, Salamuni *et al.* (2004) evidenciaram a presença de blocos altos e baixos em função de alinhamentos estruturais, onde se encaixam os maiores segmentos de drenagem. As escarpas que marcam o relevo, como resultado dos basculamentos, geraram diferenças de altitude máxima menores que 30m. Os autores acreditam que estes movimentos se deram através de reativações de estruturas do embasamento da BSC, mesmos movimentos que resultaram na diferença na dissecação do relevo da bacia hidrográfica do Rio Iguaçu, a leste e oeste da confluência com o Rio Barigui.

No ano de 2006 a empresa Minerais do Paraná publicou o Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná, em escala de 1:250.000 (MINEROPAR, 2006). Apesar da escala reduzida, é o documento mais detalhado existente para a área adotada na pesquisa, sintoma da baixa disponibilidade de material cartográfico básico para o planejamento territorial em escala de detalhe a semi-detalhe. Para elaboração do atlas foram aplicadas metodologias

fundamentadas no conceito de morfoestrutura e morfoescultura (ROSS, 1992⁵² e ROSS, MOROZ, 1996⁵³, citados por MINEROPAR, 2006). As imagens foram interpretadas com base na metodologia apresentada por Soares; Fiori (1976) e o mapeamento seguiu a metodologia apresentada por Oka-Fiori (2002). As semelhanças das formas de relevo relacionadas às condicionantes de natureza estrutural e litológica foram consideradas como os elementos básicos para a definição das unidades geomorfológicas a serem representadas nos mapas. Foram agrupadas feições com significados semelhantes, do ponto de vista da textura do relevo e da drenagem, separando aquelas feições com significados distintos. Destaca-se que a metodologia aplicada na geração dos mapas geomorfológicos do estado do Paraná fez uso de elementos texturais do relevo, tais como topos, encostas, vales e drenagens, cujo arranjo organizacional define estruturas de relevo. Assim a tropia é uma propriedade dos elementos texturais, quando estes apresentam, ou não, direções preferenciais (MINEROPAR, 2006). De modo a delimitar os diferentes compartimentos do relevo, foi usado o método de delimitação das zonas homólogas de terreno (SOARES; FIORI, 1976), onde as diferenciações na superfície da imagem gerada a partir modelo digital de elevação (SRTM - NASA, 2010), ou seja, do enrugamento da imagem, permitiu delimitar os diferentes compartimentos.

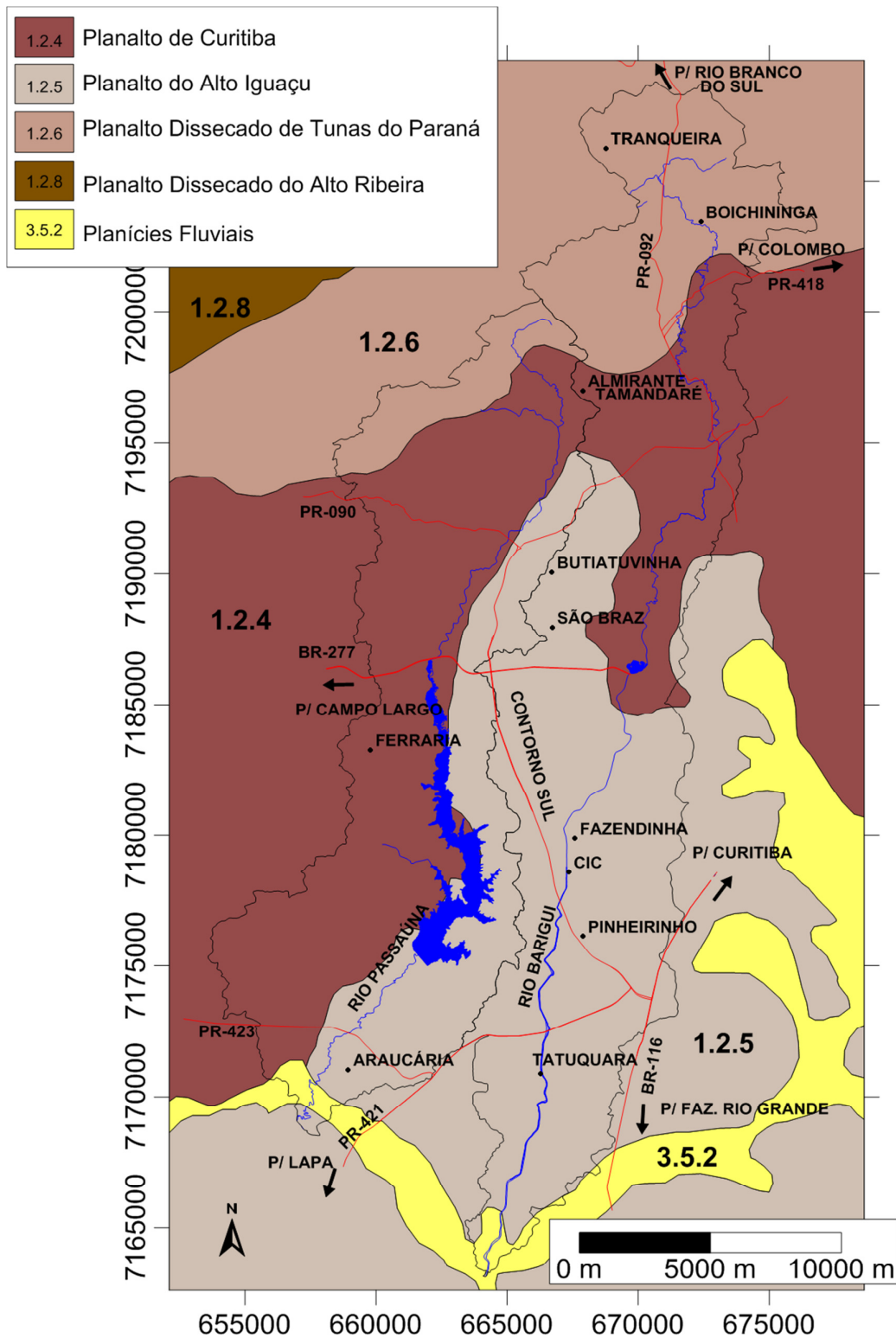
A FIGURA 3 mostra os compartimentos geomorfológicos presentes na área de pesquisa de acordo com o Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná (MINEROPAR, 2006). A área de pesquisa é dividida, inicialmente em dois domínios principais, um agradacional, representado pelas planícies aluvionares do rio Iguaçu (3.5.2), e um de dissecação (unidades 1.2.4, 1.2.5 e 1.2.6).

1. Planícies Fluviais – 3.5.2 – Relacionada à unidade morfoestrutural Bacias Sedimentares Cenozóicas e Depressões Tectônicas. É constituída por sedimentos inconsolidado do Período Quaternário;

⁵² ROSS, J. L. S. – O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. Revista do Departamento de Geografia – FFCH/USP, São Paulo, v. 6 p.17-30, 1992.

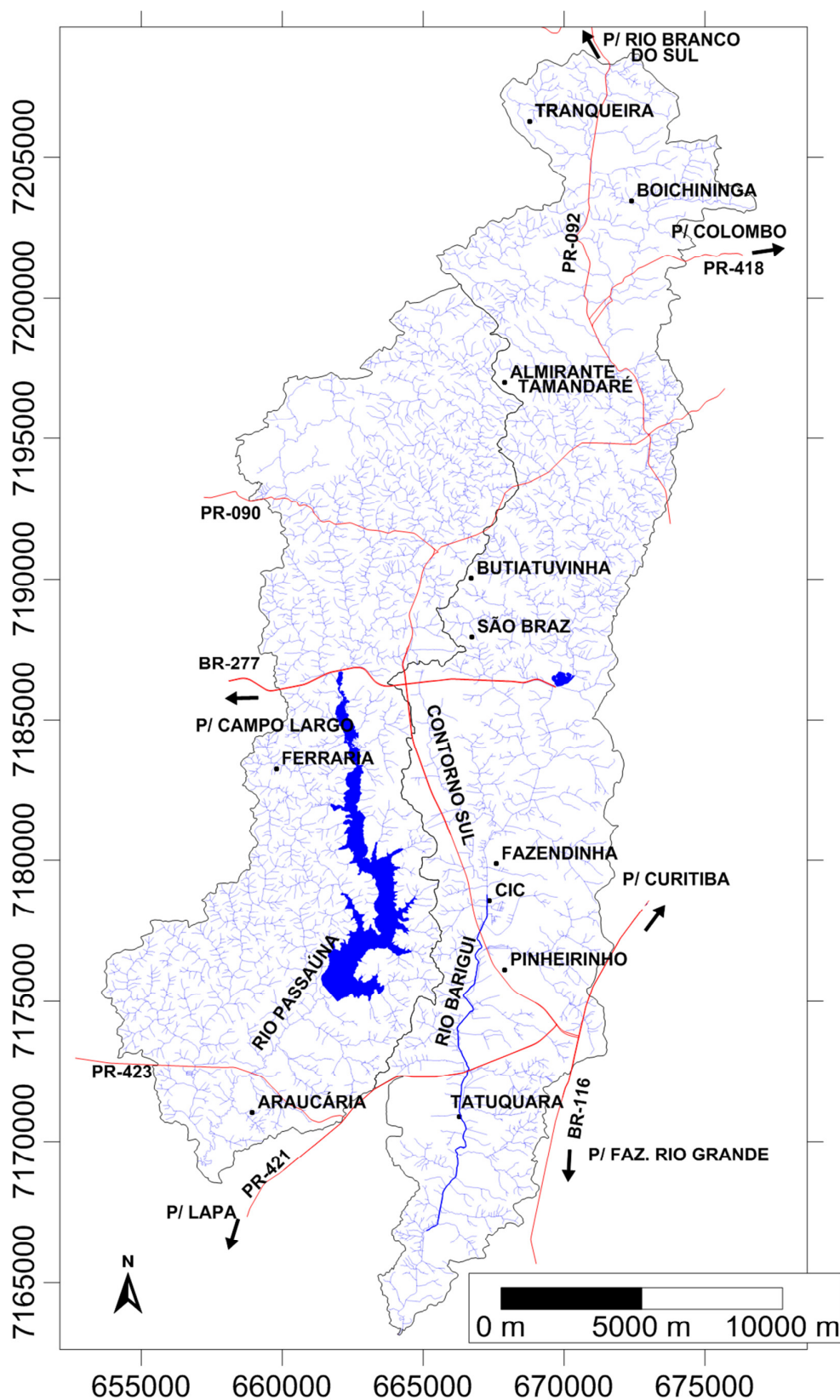
⁵³ ROSS, J. L. S. MOROZ, I. C. – Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Revista do Departamento de Geografia – FFCH/USP, São Paulo, v. 10, p. 20-32, 1996.

2. Planalto de Curitiba - 1.2.4 – Situada no Primeiro Planalto Paranaense, apresenta dissecação média, com declividade predominante menor que 6%. As formas predominantes são topos alongados e aplainados, vertentes convexas e vales em “V”, com direção geral da morfologia N-S e NW-SE, modelada sobre rochas do Complexo Gnáissico Migmatítico;
3. Planalto do Alto Iguaçu - 1.2.5 - Situada no Primeiro Planalto Paranaense, apresenta dissecação baixa, com declividade predominante menor que 6%. As formas predominantes são topos alongados e aplainados, vertentes convexas articulando-se às planícies fluviais mediante rampas suaves, vales em “V”, modeladas em sedimentos da Formação Guabirotuba e litologias do Complexo Gnáissico Migmatítico;
4. Planalto Dissecado de Tunas do Paraná - 1.2.6 – Situado no Primeiro Planalto Paranaense, apresenta dissecação alta, com classes de declividade predominantes menores que 6% até 12-30%. As formas predominantes são topos alongados e em cristas, vertentes retilíneas e vales em “V” encaixado. A direção da morfologia varia entre NW-SE e NE-SW, modela em rochas da Formação Capiçu (Grupo Açungui) (MINEROPAR, 2006).



5.3. Descrição das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui

As bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui são afluentes da margem direita do rio Iguaçu, que drena uma bacia endorréica (para o interior do continente), integrando a bacia dos rios Paraná-La Plata. Devido às características geológicas idênticas, os padrões de drenagem das duas bacias são semelhantes (FIGURA 4). A norte, associado a presença de rochas metassedimentares do Grupo Açungui, as drenagens têm padrão sub-paralelo, fortemente controlado pela geometria estrutural. Áreas onde afloram remanescentes da Bacia Sedimentar de Curitiba são caracterizadas por drenagens sub-dendríticas a sub-retangulares, também refletindo o controle estrutural dos canais, onde as maiores densidades de drenagem ocorrem em áreas dominadas por fácies argilosas da Formação Guabirotuba, enquanto fácies psamíticas resultam em menores densidades (SALAMUNI *et al.* 2004). Em áreas de afloramento do Complexo Atuba, os padrões de drenagem dendrítico a sub-paralelo são decorrentes do controle estrutural dos canais.



5.4. Solos

Nas bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui ocorrem, principalmente, cambissolos, latossolos, gleissolos e argissolos (FIGURA 5). Na porção norte das áreas, próximos as áreas de nascentes dos rios Passaúna e Barigui e associados à zona de afloramento do Grupo Açungui, são encontrados latossolos Brunos (LB), argissolos vermelho-amarelos (PVA), Cambissolos háplicos (CX), Latossolos vermelhos (LV) e Cambissolos húmicos (CH), estes últimos desenvolvidos sobre paleosuperfícies. No restante da área das bacias hidrográficas predominam os Argissolos vermelho-amarelos (PVA), Latossolos vermelho (LV) e Latossolos Bruno (LB). Localizadamente, junto aos canais dos rios Passaúna e Barigui, são encontrados Gleissolos melânicos (GM). O QUADRO 2 apresenta a associação entre os diferentes tipos de solos com a geologia, o relevo e as paleosuperfícies presentes na área.

QUADRO 2. Associação entre os tipos de solos presentes na área com a Geologia, relevo e paleosuperfícies.

Solo	Sigla	Associação
Argissolos vermelho-amarelos	PVA	Saprólitos ácidos, aluminosos, pobres em cátions, associados a rochas gnáissicas.
Latossolos vermelhos	LV	Saprólitos ácidos, ferruginosos, pobres em cátions, derivados de gnaisses máficos, anfíbolitos.
Cambissolos háplicos	CX	Saprólitos ácidos, pouco espessos, pedregosos, maiores declividades, desenvolvidos em filitos e quartzitos do grupo Açungui e gnaisses.
Latossolos brunos	LV	Manto rico em laterita, quartzo e argila, alóctone, espesso associado a paleosuperfície.
Gleissolos melânicos	GM	Solos ricos em matéria orgânica, sobre aluviões, em baixos terraços e planícies de inundação
Cambissolos húmicos	CH	Solos ricos em matéria orgânica, desenvolvidos e preservados em paleosuperfícies.

5.5. *Clima*

Segundo classificação de padrões climáticos de Köppen a região do Alto Iguaçu apresenta clima tipo *Cfb*. Trata-se de clima subtropical úmido, mesotérmico, com verões frescos, sem estação seca de inverno bem definida, com frequentes geadas. As temperaturas variam entre mínimas médias de 12-13°C a máximas médias entre 20-21 °C. Nestas condições as precipitações pluviométricas apresentam-se regulares em todos os meses do ano.

Deve ser lembrado que em períodos recentes, durante o desenvolvimento da paisagem atual na área, o clima variou bastante na região, tendo sido frio, variando de seco a úmido desde o Plioceno até as glaciações quaternárias (paleosuperfícies com formações húmicas terraceadas), e tropical úmido com estação seca (savana) no Mioceno (registrado nos paleo-latossolos e na Formação Tinguís), frio e semi-árido no Oligoceno (registrado nos sedimentos da formação Guabirota, nos altos interflúvios da área) (SOARES *et al.* 2011). Parte das características dos solos e do relevo presentes deve ser atribuída a estes diferentes estágios climáticos.

5.6. *Características hipsométricas das bacias dos rios Passaúna e Barigui*

A curva hipsométrica corresponde ao somatório dos intervalos de área por altitude, representando numericamente o volume de material rochoso existente sob a superfície erosiva atual, até o nível da desembocadura do rio (RIFFEL, 2005). A interpretação de atributos derivados da curva hipsométrica, originalmente denominada como integral hipsométrica (STRAHLER, 1952), contribui para a identificação de paleosuperfícies presentes nas bacias hidrográficas.

A construção das curvas hipsométricas para as duas bacias em estudo, sobre dados altimétricos do sensor SRTM (90 x 90m) foi baseada na contagem de celas agrupadas em intervalos altimétricos de 5m. Através da geração de um gráfico de dispersão entre o intervalo altimétrico e a área total das celas compreendidas no intervalo, são apresentadas as curvas hipsométricas para a bacia hidrográfica do rio Passaúna (FIGURA 6) e do rio Barigui (FIGURA 7).

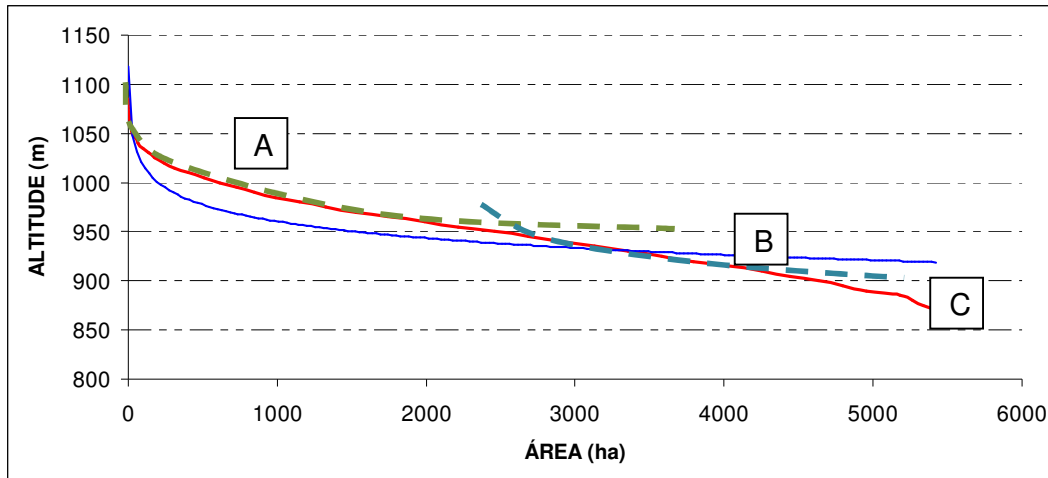


FIGURA 6. Curva hipsométrica da bacia do rio Passaúna (vermelho). Em azul é mostrada a linha de tendência logarítmica ajustada à curva hipsométrica. Nota-se que a curva pode ser dividida em três segmentos (A, B e C) por dois pontos de quebra, correspondentes a três estágios evolutivos, conforme (SOARES; RIFFEL, 2006).

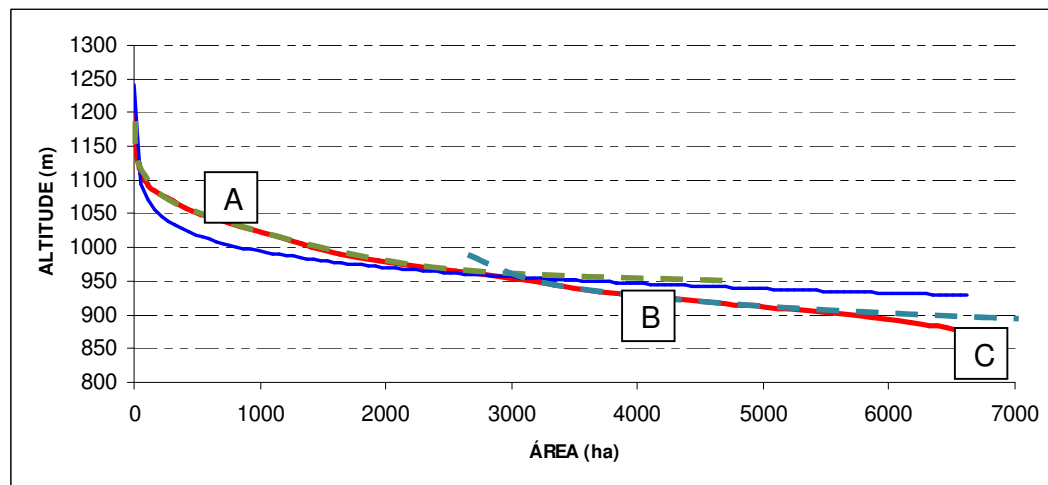


FIGURA 7. Curva hipsométrica da bacia do rio Barigui (vermelho). Em azul é mostrada a linha de tendência logarítmica ajustada à curva hipsométrica. Nota-se que a curva pode ser dividida em três segmentos (A, B e C) por dois pontos de quebra, correspondentes a três estágios evolutivos, conforme (SOARES; RIFFEL, 2006)

De acordo com Strahler (1952), as superfícies planas definem um patamar na curva hipsométrica, isso porque representa um incremento da área em uma determinada altitude. Conforme descreve Riffel (2005) o significado geomórfico para a ocorrência desses patamares pode ser explicado por diferentes hipóteses teóricas. Admite-se que o relevo evolui erodindo as porções elevadas, depositando os sedimentos abaixo do nível de base da bacia. Esta condição resulta em uma tendência ao aplainamento, admitindo-se

como estáveis tanto as condições climáticas quanto tectônicas. Com base nessas premissas torna-se possível modelar o patamar, inferindo seu nível de base, intervalo altimétrico preservado e o declive esperado para a superfície aplainada. Feições convexas na curva, marcadas pela existência de ponto de ruptura abaixo de patamares, indicam a ocorrência de incisão fluvial na superfície ora aplainada. De forma a caracterizar uma superfície aplainada, a curva hipsométrica deve mostrar baixa declividade (pouca variação altimétrica).

Observando a curva hipsométrica construída para a bacia do rio Passaúna (FIGURA 6), observa-se que esta, no geral, não se ajusta a um modelo de curva de aplainamento (SOARES; RIFFEL 2006). Entretanto, observa-se que ocorrem dois intervalos onde há incremento na declividade da curva, o primeiro próximo à altitude de 960m e o segundo aproximadamente em 880m. Acima destes pontos ocorrem patamares associados a remanescentes de superfícies aplainadas. O segmento A da curva corresponde à paleosuperfície S1, ou dos latossolos, de Riffel (2005) ou superfície Curitiba de Ab'Saber; Bigarella (1961). O segmento B, corresponde às rampas de colúvio, onde ocorrem formações húmicas. A porção final da curva hipsométrica, segmento C, onde ocorre uma acentuação da declividade, e é conservada a forma convexa, é associada ao entalhamento fluvial atual que tende a reduzir a superfície até o nível de base da bacia (aproximadamente 870m).

Através da construção de um histograma de frequência de celas para intervalos de 5m nas altitudes da bacia do rio Passaúna (FIGURA 8) percebe-se que este não apresenta uma distribuição normal, unimodal, como esperado para um relevo onde ocorre apenas uma fase de erosão das áreas de cabeceiras e deposição do material a jusante, abaixo do nível de base. A distribuição é tipicamente bimodal, com modas em 915 e 950m. Outra feição importante do histograma é a presença de uma classe de frequência anômala, em 885m. É possível correlacionar, portanto, a moda em 950m e a frequência anômala em 885m com os patamares observados na curva hipsométrica da FIGURA 6, corroborando com a presença de superfícies aplainadas de pequena expressão no interior da bacia.

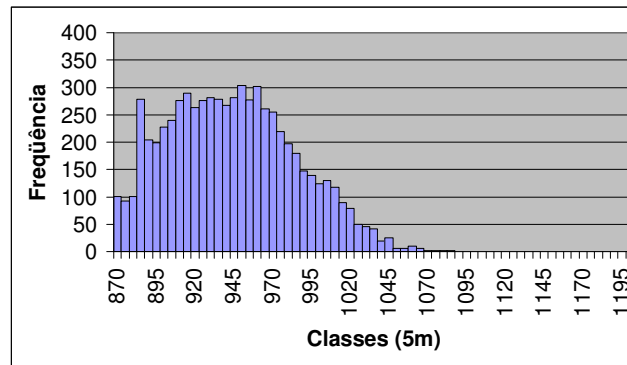


FIGURA 8. Histograma de frequência de altitudes da bacia do rio Passaúna. Intervalos de classes de 5m.

Para a bacia do rio Barigui a curva hipsométrica (FIGURA 7) apresenta também acentuado declive, sem marcar a presença de importantes superfícies aplainadas regionais. Entretanto observam-se sutis suavizações do declive geral da curva, aproximadamente nas altitudes de 960m e 910m. No final da curva hipsométrica, em torno da altitude de 880m observa-se a presença de um ponto de ruptura da curva, mostrando desta altitude para baixo uma morfologia convexa, o que representa o entalhamento da atual rede de drenagem.

No histograma de frequência de celas para intervalos de 5 metros nas altitudes da bacia do rio Barigui (FIGURA 9), a distribuição dos dados mostra três intervalos que se destacam. O primeiro intervalo, representando a classe modal, fica localizado na classe de 910m, o segundo em cerca de 960m e o último, mais suave, em 1020m. Os dois primeiros intervalos são correlatos às duas suavizações evidenciadas na curva hipsométrica da bacia do rio Barigui (FIGURA 7), relacionadas a patamares remanescentes de superfícies aplainadas de pouca expressão na bacia.

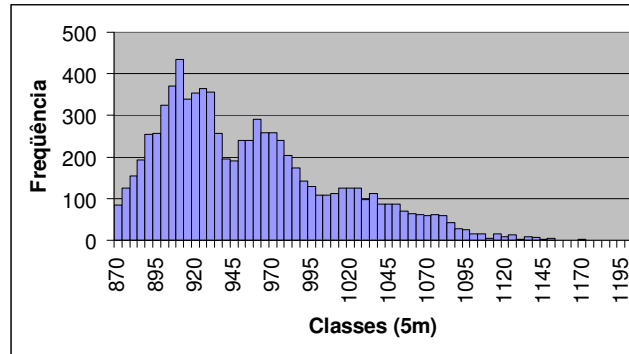


FIGURA 9. Histograma de frequência de altitudes da bacia do rio Barigui. Intervalos de classes de 5m.

O terceiro patamar, de moda em 1020m, corresponde à paleosuperfície S2 de Riffel (2005), cujos depósitos correlativos são considerados os sedimentos da formação Guabirotuba. Esta paleosuperfície corresponde ainda à paleosuperfície de pedimentos Pd2 de Ab'Saber; Bigarella (1961).

6. Hipótese de trabalho

Unidades de paisagem geomórficas, ou UPGs, podem ser representadas por elementos descritivos do relevo, independentes, que qualificam e quantificam atributos da paisagem, os quais refletem processos atuais ou históricos. Tais elementos podem ser obtidos a partir de dados georrefenciados globalmente disponíveis, e constituem critérios diagnósticos das UPGs.

Este trabalho procura demonstrar a hipótese de que é possível reconhecer e mapear, com uma metodologia multivariada, basicamente a partir de atributos do variograma, diferentes unidades de paisagens geomórficas incluindo diferentes estados prévios e atuais da paisagem, utilizando-se de recursos da inteligência artificial.

Fazendo uso de recursos de inteligência artificial e combinação probabilística, descobrindo o poder e pesos das variáveis (indicadores) selecionadas, propõe-se que seja possível caracterizar e classificar diferentes UPGs, com base em dados derivados de sensores remotos, disponíveis gratuitamente para grandes extensões territoriais.

A associação de indicadores (evidências) para classificação dos diversos tipos de paisagens, derivados de dados digitais de sensores remotos, como elevação do terreno e refletância espectral e pancromática, definem assinaturas geomórficas das UPGs. Tais assinaturas podem, portanto, ser ponderadas por um algoritmo matemático, resultando na probabilidade de ocorrência de cada UPG em toda a área de estudo.

7. Materiais

A metodologia proposta neste trabalho é centrada no processamento de dados georreferenciados, através de um conjunto de atributos espaciais provenientes de duas fontes distintas: modelo numérico de terreno obtido com radar (SRTM) e imagem espectral de superfície, obtida por sensores remotos em satélite. Considerou-se também a possibilidade de utilizar dados aerogeofísicos, entretanto justamente na área escolhida estas dados não foram obtidos por razões operacionais (áreas urbanizadas).

Foram utilizados dados altimétricos provenientes do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (Nasa, 2010), disponibilizados gratuitamente já convertidos em altitude do terreno e processados para a construção do modelo digital de elevação do terreno (MDET). Originalmente os dados apresentavam resolução espacial de 3 arco-segundos (cerca de 90 x 90m) e resolução altimétrica mínima de 16m.

A partir do MDET, foram concebidos e derivados 10 atributos descritores do relevo, conforme listados abaixo:

- Altimetria - mapa hipsométrico;
- Declividade – taxa de variação da altimetria;
- Forma da encosta – curvatura em planta;
- Forma da encosta – curvatura em perfil;
- Índice de rugosidade do relevo (IRR);
- Índice de angulosidade do relevo (IAN);
- Índice de densidade de relevo (IDR);
- Índice de anisotropia de relevo (IAR);
- Direção de anisotropia de relevo;
- Dimensão fractal do relevo.

Enquanto os atributos altimetria, declividade e formas das encostas (em planta e em perfil) são amplamente difundidos e disponíveis como padrão em aplicativos de Sistemas de Informação Geográfica, os demais atributos morfométricos apresentados foram processados através de uma nova proposta metodológica. Esta proposta é baseada no cálculo da variância altimétrica (em

função da distância) no entorno de cada cela, através da seleção de dados internos a uma janela móvel de dimensões pré-definidas. O detalhamento dos cálculos realizados e suas relações com a geomorfometria são apresentados por Bettú; Soares (no prelo – ANEXO 1) e reproduzidos sucintamente na seção “Análise da variância altimétrica aplicada ao mapeamento morfométrico”.

Os atributos descritores do relevo listados acima se referem apenas às características geomórficas do modelado. De forma a incorporar informações relacionadas às condições de uso do solo, consequência da ação antrópica na área de pesquisa, foi adotada uma imagem orbital multi-espectral do sensor Landsat 5. A escolha deste sensor se deu devido a disponibilidade de cenas gratuitas de alta qualidade, disponíveis para *download* na página virtual do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (www.inpe.br), através de interface visual que possibilita uma pré-visualização das cenas, evitando condições atmosféricas indesejáveis, como por exemplo, uma ampla cobertura de nuvens. Desta forma foi escolhida uma cena obtida no inverno de 1993 (15 de julho, banda 220 – cena 078), adquirida na forma digital, com correções atmosférica e geométrica, multi-espectral, incluindo as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, com resolução espacial de 30m. Após a fusão das bandas, mantendo as celas (*pixels*) quadradas com lados medindo 30m (dimensões originais), a cena que originalmente compreende uma área quadrada com lados medindo 185km foi cortada, restando apenas um polígono no entorno da área de pesquisa. Tal medida foi adotada para redução do tamanho do arquivo digital, desta forma reduzindo o tempo de processamento dos atributos, sem prejuízo das informações espectrais, já que não houve alterações nos números digitais das bandas escolhidas. Foram calculados dois índices relacionados às condições da vegetação presente na área: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) e Índice de Umidade por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index* - NDWI).

A opção por adotar os atributos acima listados, todos gratuitos, permite que as técnicas de cartografia das unidades de paisagem geomórficas propostas neste trabalho sejam reproduzidas em áreas diversas do globo, uma

vez que tanto os dados do sensor SRTM como Landsat (5 ou 7) têm ampla cobertura e são obtidos com facilidade.

8. Metodologia proposta

Técnicas aplicadas usualmente ao mapeamento de Unidades de Paisagem (UP), e que podem ser extrapoladas para Unidades de Paisagem Geomórficas (UPG), são comumente baseadas na superposição de cartas temáticas (e.g. cartas de solos, declividade do terreno) em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), ou na aplicação do conceito de redes neurais. A aplicação de redes neurais, cada vez mais difundida nestes estudos, baseia-se na simulação do comportamento dos circuitos neurais humanos para resolução de problemas. Suas características de maior relevância, descritas em Haykin (1999), são: a capacidade de considerar o comportamento não-linear dos fenômenos físicos; capacidade de aprendizado através de etapas de treinamento com exemplos de entrada/saída; adaptatividade e tolerância à falhas dos elementos unitários (neurônios). Estas metodologias, já consagradas, surgem como alternativa às delimitações cartográficas baseadas na experiência do intérprete, das quais resultam elevada subjetividade (VAN WESTEN, 1993⁵⁴, citado por, KLINGSEISEN *et. al*, 2007).

Tentativas de aumentar a automatização do processo através da integração de dados de sensores remotos, como imagens orbitais multi-espectrais e modelos digitais do terreno, ainda apresentam resultados insatisfatórios (SCHMIDT; DIKAU, 1999⁵⁵, citado por KLINGSEISEN *et. al*, 2007; BRABYN, 1997; DIKAU *et al.*, 1991; GROHMANN *et al.* 2010). Na maioria dos casos as feições de interesse (indicadores) são classificadas corretamente, porém a integração das variáveis visando delimitar diferentes UPs, representa ainda grande desafio, em decorrência da dificuldade de desenvolvimento de algoritmos que contemplem coerentemente a

⁵⁴ VAN WESTEN, C.J. GISSIZ training package for geographic information systems in slope instability zonation, UNESCO-ITC Project. ITC. Publication No. 15, Enschede. 1993.

⁵⁵ SCHMIDT, J., DIKAU, R. Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models: semantics, methods, future needs. In: DIKAU, R.; SAURER, H.: GIS for Earth Surface Systems: Analysis and Modelling of the Natural Environment, Berlin, Stuttgart: Borntraeger: 153-173p. 1999.

complexidade das relações entre as estruturas vertical e horizontal da paisagem. Enquanto a estrutura vertical reflete a superposição dos indicadores, como por exemplo, a declividade ou a rugosidade do relevo, a estrutura horizontal trata da espacialização destas características. A dificuldade maior está em definir os limites entre as diferentes UPs, já que os indicadores (estrutura vertical) variam de forma independente, em taxas de variação e tendências direcionais diferentes. Esta variação é tida como contínua apenas para efeito de estimativa, uma vez que são utilizados múltiplos pontos na composição do atributo, mesclando pontos de diferentes unidades de relevo.

Uma concepção de UPG a caracteriza como um conjunto de diferentes indicadores, tendo como associação característica a porção central de uma área, com gradativa descaracterização em direção à sua periferia. Esta condição resulta em uma dificuldade de definir os limites entre as UPGs, já que a partir de um zona central estas gradativamente perdem suas características, adquirindo feições de outras unidades. Muitos autores aplicaram a lógica difusa (*fuzzy*) na tentativa de resolver esta questão, porém em todos os casos é necessário introduzir no cálculo um valor de corte para cada atributo (*threshold*), fornecido empiricamente pelo usuário.

Entretanto, na natureza, a maioria das UPGs são caracterizadas por uma repetição das propriedades ao longo de toda a sua área de definição. Por exemplo, não há transição entre uma planície aluvial e um relevo de erosão fluvial, mas sim um limite definido. Entretanto os algoritmos utilizados, mesmo o de declividade e especialmente os estatísticos, acabam gerando uma zona de transição entre a encosta e a planície aluvial. Então, não é pelo fato de estar acima de um valor de corte que a cela está contida ou não em uma UPG. Isto mostra a necessidade de utilizar outro critério.

De modo a automatizar o processo e reduzir a subjetividade da interpretação, apresentamos uma nova proposta metodológica para a classificação e mapeamento das unidades de paisagem geomórficas, fundamentada na metodologia de fotointerpretação geológica proposta por Soares; Fiori (1976), definida pelo reconhecimento de elementos texturais e estruturais do relevo, cuja ocorrência repetida em uma área contínua compõe uma zona homóloga, de padrões de relevo, drenagem e/ou vegetação. Nesta

abordagem os elementos texturais de relevo são confrontados entre si no interior de cada UPG, através da aplicação de técnica probabilística multivariada, definindo relações de coexistência entre os diversos elementos que condicionam a ocorrência de cada unidade. Assim, cada zona homóloga de terreno, conforme definido por Soares; Fiori (1976), é transformada (nesta abordagem) em uma unidade de paisagem geomórficas (UPG).

Da mesma forma que as técnicas de fotointerpretação geológica (SOARES; FIORI, 1976) independem da escala das fotografias aéreas adotadas, já que as relações entre diferentes feições texturais e estruturais do relevo tendem a se manter nas diferentes escalas de observação (fenômeno fractal), nesta nova metodologia a escala dos dados de entrada é flexível. Tal condição novamente favorece a replicação das técnicas de cartografia de UPGs propostas, pois a flexibilidade da escolha da escala de trabalho permite que esta seja reproduzida em escalas que vão do detalhe à continental, desde que o conjunto de atributos adotados apresente resolução suficiente para tal. Portanto a definição do número de UPGs a serem cartografadas deve ser produto da escala de trabalho pretendida, mas também da resolução dos dados de entrada (atributos).

Devido à diversidade de fontes e técnicas de cálculo dos atributos adotados no estudo, o primeiro passo para a aplicação das técnicas de cartografia de UPGs é a compatibilização das escalas dos diversos temas, através da reamostragem, quando necessária, dos pontos ou nós de cada malha. Desta forma todos os atributos podem ser integrados em uma malha regular única, no modelo de teste composta por 926 celas quadradas, com 720 metros de lado.

A opção por adotar os atributos acima listados, todos derivados de fontes gratuitas, permite que as técnicas de cartografia das unidades de paisagem geomórficas propostas neste trabalho sejam reproduzidas em áreas diversas do globo, uma vez que tanto os dados do sensor SRTM como Landsat (5 ou 7) têm ampla cobertura do globo e são obtidos com facilidade.

Visando incorporar o conceito de incerteza da informação, todos os atributos de variação contínua necessitam ser categorizados em classes “Baixa”, “Moderada” e “Alta”, e em classes azimutais para atributos direcionais,

como a direção da anisotropia de relevo. A discretização dos valores deve ser realizada através da identificação dos limites naturais entre as classes. Depois de identificados os limites naturais entre as classes, para incorporar a incerteza, estes devem ser expandidos para o interior de cada categoria, de forma a contemplar as amostras (celas) do entorno dos limites. Para tanto deve ser calculado, para cada categoria, o intervalo total de valores e considerado um limite de tolerância nas proximidades dos limites inferior e superior. No exemplo testado as amostras que apresentaram valores com diferenças menores que 10% deste intervalo, em relação ao limite entre esta classe e a classe sucessiva, foram consideradas incertas quanto a pertencer a uma ou outra classe. Este cuidado metodológico se justifica pelo fato de que tal situação poderia configurar um caso no qual o ponto referido (cela, coordenadas X e Y) conteria valores dos pontos diversos de áreas vizinhas utilizados na estimativa.

Inicialmente o conjunto global de atributos é investigado quanto à independência entre as variáveis. É condição recomendável para a aplicação de técnicas de probabilidade condicional que as variáveis investigadas sejam independentes, pois quanto mais independente mais representativo é o resultado. Uma vez que o cálculo do valor da probabilidade é o produto da multiplicação das probabilidades individuais de cada variável, a dependência (redundância) entre variáveis gera produtos de probabilidades espúrios, superestimando ou subestimando sua real influência. A verificação de independência pode ser realizada calculando-se a correlação entre os valores absolutos de cada variável (dados contínuos), através da construção de uma matriz de similaridade baseada no cálculo do coeficiente de correlação de Pearson.

Com base na identificação da dependência entre atributos é possível eliminar aqueles mais redundantes e proceder a continuação dos trabalhos apenas sobre aqueles menos dependentes. A opção por adotar um atributo para os cálculos em detrimento de outro, com o qual este apresentou alta correlação, pode ser realizada pela comparação de ambos com os demais, também quanto ao valor do coeficiente de correlação. Aquele que mostrar

menor correlação com as demais variáveis deve ser escolhido, em detrimento do segundo, que será eliminado.

Definido o conjunto de atributos independentes a serem integrados, a próxima etapa de trabalho é a definição prévia da quantidade de Unidades de Paisagem Geomórficas (UPGs) que se espera distinguir e mapear na área. Esta estimativa depende de um conhecimento prévio da geomorfologia e ocupação da área e, conforme já citado, é função da resolução dos dados (atributos) disponíveis e da escala de trabalho adotada.

A metodologia proposta neste trabalho é baseada na aplicação da técnica de análise de favorabilidade (probabilidade condicional), que utiliza a metodologia descrita por Agterberg (1989⁵⁶) e por Rostirolla *et al.* (1998⁵⁷), e apresentada em Soares *et al.* (2002). Entretanto é proposta a adoção de um modelo analítico e preditivo alternativo, com a incorporação da incerteza da informação, conforme aplicativo computacional desenvolvido por Soares (2011a). Nesta abordagem a aplicação da teoria da probabilidade condicional, adaptada a partir da Regra de Bayes, foi escolhida de forma a reduzir a subjetividade da decisão humana no processo automatizado de classificação de UPGs.

Preliminarmente à aplicação da análise de favorabilidade é necessário o desenvolvimento de modelos conceituais de cada UPG pretendida para mapeamento. Tais modelos são fundamentados na associação de atributos descritores do relevo que ocorrem no interior de cada UPG, ou seja, sua estrutura vertical, e que a diferencia das demais. A estrutura vertical da paisagem geomórfica (associação de atributos que a distingue) é característica e melhor definida em sua porção, mostrando variação lateral complexa (estrutura horizontal), já que cada atributo é controlado por elementos distintos,

⁵⁶ AGTERBERG F.P. 1989. Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration. In: APCOM SYMPOSIUM 21. Las Vegas, Anais... Las Vegas, Proceedings, p. 165-178. 1989.

⁵⁷ ROSTIROLLA S.P., SOARES P.C. & CHANG H.K. Bayesian and multivariate methods applied to favorability quantification in Reconcavo Basin and Ribeira Belt, Brazil. *Nonrenewable Resources*, 7 (1): 7-24. 1998.

independentes. Esta consideração é de suma importância na construção dos modelos conceituais das UPGs.

Operacionalmente os modelos conceituais são representados por amostras (celas) características selecionadas para cada compartimento geomórfico (UPG) que se pretende mapear. Cada amostra, então, é constituída por um conjunto de atributos descritores do relevo, discretizados, os quais diferenciam esta UPG das demais. No interior das celas amostrais, tais atributos descrevem as características geomórficas predominantes para a UPG em questão, e que podem ser transcritos em termos geomorfológico-ambientais.

De modo a subsidiar a próxima etapa do desenvolvimento metodológico (análise de favorabilidade) é necessário que cada UPG seja caracterizada por um conjunto consistente de amostras, as quais considerem certo grau de liberdade de variação dos atributos, porém mantendo a essência da associação que caracteriza a unidade. Complementando a amostragem também devem ser fornecidas amostras da não-presença da UPG, ou seja, celas que se sabe, *a priori*, pertencerem a outra unidade que não aquela em avaliação. Para efeitos de cálculos, todas as demais celas da malha pretendida para mapeamento (que não sejam amostras da presença ou da não-presença da unidade) são consideradas como incertas quanto à pertencer à UPG. É para estas celas (não amostras) que os cálculos da análise de favorabilidade resultarão na probabilidade de que pertençam à unidade em questão, a partir da avaliação da estrutura vertical (associação de atributos descritores do relevo) presente, comparando-a com as amostras fornecidas.

Optou-se, nesta abordagem de teste metodológico, em eleger as amostras da presença ou não-presença (ausência) das cinco UPGs a serem cartografadas a partir de uma classificação estatística de unidades, com base nos atributos descritores do relevo discretizados. Com base na identificação preliminar, em campo e sobre o modelo digital de elevação do terreno, foram selecionados cinco domínios geomórficos (UPGs), claramente distintos entre si. Definido o número de cinco UPG para mapeamento, procedeu-se uma análise de agrupamento dos atributos descritores do relevo (discretizados em classes) por k-médias. Neste procedimento, as sucessivas iterações do aplicativo

computacional sobre as amostras (celas) procurou separá-las em cinco grupos, com mínima variância interna e máxima variância intergrupos.

Posteriormente foram selecionadas celas amostrais, geograficamente centrais de conjuntos consistentes de celas de uma mesma UPG, de modo a caracterizar a unidade do ponto de vista das condições dos atributos presentes, resultando em modelos conceituais das UPGs.

Na análise de favorabilidade, cada UPG é associada aos atributos descritores do relevo, estes que categorizados (p.ex. alto, médio ou baixo) são avaliados para determinação de sua necessidade ou suficiência para a ocorrência de cada UPG. Tais informações são fundamentais na análise de favorabilidade, pois é através delas (presença ou ausência dos atributos) que se determina a probabilidade de que o evento em questão ocorra em cada cela, ou seja, se a cela pertence ou não à UPG avaliada.

Conforme proposto por Agterberg (1989⁵⁸, citado por SOARES *et. al*, 2002), a suficiência de uma evidência (variável) indica que quanto mais esta esteja presente, a probabilidade de ocorrência do evento é maior que a probabilidade de não ocorrência. Entretanto, o conceito de necessidade de uma variável apresentado por Agterberg (1989⁵⁸) é contraditório com a concepção usual e lógica do termo. Para este autor, uma evidência é considerada necessária quando, dada a ausência da evidência, o logaritmo da razão entre a probabilidade de ocorrência de um dado evento e a probabilidade de que o evento não ocorra é negativo. Diz-se, então, que uma variável é necessária quando seu valor calculado é negativo. De modo a tornar mais lógico o conceito original de necessidade de Agterberg (1989⁵⁸), Soares (2000) propôs uma modificação na abordagem, esta adotada neste trabalho, onde a necessidade positiva de uma evidência indica que a probabilidade de ocorrência do evento é maior que o somatório das probabilidades de não ocorrência e de ocorrência incerta. No outro extremo, necessidades negativas indicam que na ausência da evidência, a probabilidade de ocorrência do evento

⁵⁸ AGTERBERG F.P. 1989. Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration. In: APCOM SYMPOSIUM 21. Las Vegas, Anais... Las Vegas, Proceedings, p. 165-178. 1989.

é menor que a soma das probabilidades de não ocorrência ou de ocorrência incerta. Desta forma, o contraste entre a necessidade e a suficiência (necessidade + suficiência) de uma evidência indica o peso de que esta modifica a chance prévia de ocorrência do evento (SOARES, 2000). Contrastes elevados indicam, portanto, que a presença da evidência aumenta a probabilidade de ocorrência do evento, enquanto sua ausência diminui esta probabilidade, indicando que a evidência em questão possui elevado peso modificador da chance prévia.

Conforme metodologia apresentada por Soares (2000), a integração das malhas de atributos (indicadores), deve ser feita utilizando uma modificação na técnica de análise de favorabilidade (SOARES *et al.*, 2002), que se utiliza da regra de Bayes. Nesta abordagem, a ocorrência de um indicador **E** (evidência, ou seja, um atributo descritor do relevo) modifica a probabilidade prévia de constituir uma unidade **H** (hipótese, ou seja, uma UPG), por um fator igual à probabilidade da existência de **E** dado à ocorrência do evento **H**, ou:

$$P(H|E) = p(H) \cdot p(E|H) \quad (1)$$

Onde **P(H|E)** é a probabilidade de ocorrer o evento **H** dado a presença do indicador **E**; **p(H)** é a probabilidade prévia de ocorrer **H**; e **p(E|H)** é a probabilidade de ocorrer **E**, dada a presença do evento **H**.

Nesta mesma linha de raciocínio, trabalhamos tanto com **p(H)** (existência da unidade **H**), **p(nH)** (inexistência de **H**) e **p(iH)** (incerteza da existência de **H**), que concorrem num mesmo espaço e cuja soma é 1. Da mesma forma **p(H|E)** (ocorrência de **H** dado a presença do indicador **E**), **p(H|nE)** (probabilidade de ocorrer **H** dado a inexistência de **E**) e **p(H|iE)** (probabilidade de ocorrer **H** com a incerteza da existência de **E**) somam 1. Podemos estabelecer as relações homólogas no espaço do indicador **E**:

$$P(nH|E) = p(nH) \cdot p(E|nH) \quad (2)$$

$$P(iH|E) = p(iH) \cdot p(E|iH) \quad (3)$$

Onde $P(nH|E)$ é a probabilidade de não ocorrer **H** dado a presença de **E**; e $P(iH|E)$ é a incerteza da ocorrência de **H** dado a presença de **E**.

A razão entre estas probabilidades e seus espaços complementares constitui a chance (**Ch**) de ocorrer o tipo de situação estabelecida. Assim tem-se:

$$Ch(H|E) = [p(H)/(1-p(H))] \cdot [p(E|H)/(1-p(E|H))] \quad (4)$$

Ou seja, a chance de ocorrer **H** dado a presença de **E** é igual a probabilidade prévia de ocorrer **H** multiplicada pelo quociente da probabilidade de ocorrer **E** dado a presença de **H** pelo restante de seu espaço complementar das probabilidades ($p(E|nH) + p(E|iH)$), que recebe o nome de fator modificador (**F**). Da mesma forma:

$$Ch(nH|E) = [p(nH)/(1-p(nH))] \cdot [p(E|nH)/(1-p(E|nH))] \quad (5)$$

Onde a chance de não ocorrer **H** dada a presença de **E** é o produto de sua chance prévia pelo quociente da probabilidade de ocorrer **E** dada a inexistência de **H** por **F**, e:

$$Ch(iH|E) = [p(iH)/(1-p(iH))] \cdot [p(E|iH)/(1-p(E|iH))] \quad (6)$$

Onde a chance da ocorrência de **H** ser incerta dada à presença de **E** é o produto de sua chance prévia pelo quociente da probabilidade de ocorrer **E** dada a incerteza da presença de **H** por **F**.

Estas mesmas relações podem ser estabelecidas para o domínio da não ocorrência de **E** (**nE**), e outras tantas para o domínio de **E** incerto (**iE**).

Os dois fatores do segundo membro, a chance prévia e o fator modificador (**F**), de cada relação podem ser obtidos pelo conjunto de observações. De tal forma que as chances do evento podem ser determinadas para cada domínio do indicador geomórfico **E1**, passando esta a constituir uma

chance prévia que é usada para a determinação no domínio do indicador geomórfico **E2** e sucessivamente para os domínios dos diversos indicadores.

$$\text{Ch} (H|E,nE,iE) = \text{Ch} (H) \cdot \text{Fs},n,i1.\text{Fs},n,i2.\text{Fs},n,i3... \text{Fs},n,in \quad (7)$$

$$\text{Ch} (nH|E,nE,iE) = \text{Ch} (nH) \cdot \text{Fs},n,i1.\text{Fs},n,i2.\text{Fs},n,i3... \text{Fs},n,in \quad (8)$$

$$\text{Ch} (iH|E,nE,iE) = \text{Ch} (iH) \cdot \text{Fs},n,i1.\text{Fs},n,i2.\text{Fs},n,i3... \text{Fs},n,in \quad (9)$$

Onde **Fs,n,i** são os fatores modificadores em cada condição do indicador presente (s), ausente (n) ou incerto (i), respectivamente, para o indicador **i**. Tendo-se a chance *a posteriori* das diversas condições do evento (**H, nH e iH**), e considerando que a probabilidade do evento e seu complemento soma 1, determina-se o valor da probabilidade de cada condição do evento.

Como resultado da análise de favorabilidade, cada evento **H**, ou seja, cada uma das UPGs é classificada quanto à probabilidade de que ocorra, em cada uma das celas componentes da malha de investigação. Teremos então para cada UPG um mapa onde cada cela é classificada quanto à probabilidade de que esta pertença à unidade, com valores extremos entre 0 (0% de probabilidade de pertencer) e 1 (100% de probabilidade de pertencer). Outro resultado importante, e que representa um avanço na classificação de UPGs, é a quantificação da ambiguidade dos resultados, calculada com base na incerteza ou contradição da informação disponível. A ambiguidade fornece importante critério para a aplicação dos resultados, sendo considerado como melhores os resultados que apresentarem os menores valores de ambiguidade.

O fluxograma metodológico para mapeamento de Unidades de Paisagem Geomórficas proposto neste trabalho é mostrado na FIGURA 10.

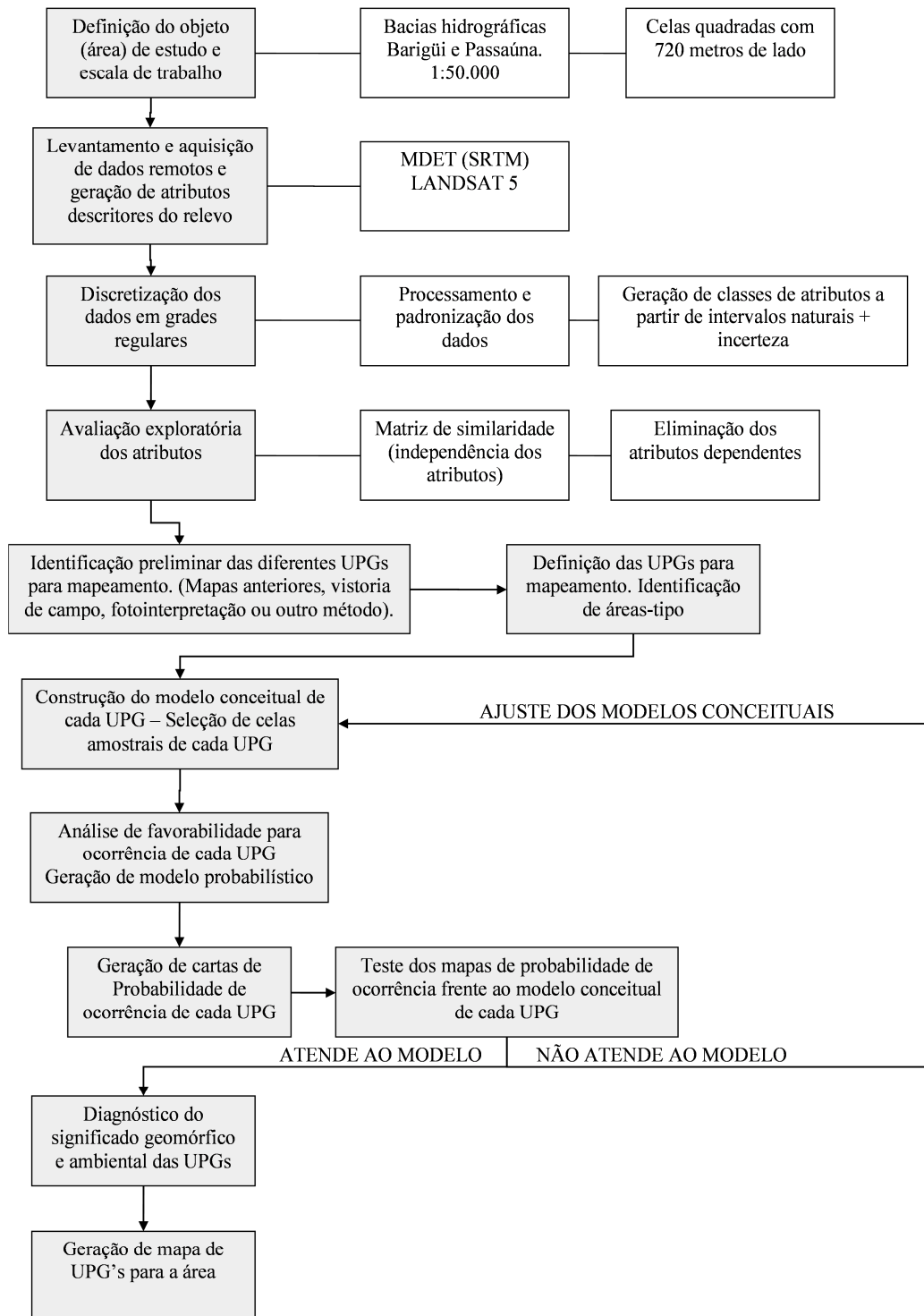


FIGURA 10. Fluxograma metodológico proposto para cartografia de UPGs.

9. Fundamentação teórica da metodologia

Em meados do século XX, autores como Glock (1931⁵⁹) e Horton (1945⁶⁰), citados por Sampaio (2008) apresentaram as bacias hidrográficas através de um prisma de contínua evolução, onde as formas das bacias de drenagem são o resultado de interações entre as estruturas e os processos, ao longo do tempo. Segundo Sampaio (2008), esta percepção foi seguida por Wolman; Miller (1960⁶¹), e também por Schumm (1956) e Beven; Kirkby (1993⁶³), para os quais a forma atual do relevo resulta da ação de processos através do tempo, assim como de suas relações com a estrutura e a constituição geológica. Também Young (1972⁶²) que afirma que a sucessão de formas passadas conduz às formas atuais do relevo (SAMPAIO, 2008).

Sampaio (2008) apresenta também os trabalhos de Beven; Kirkby (1993⁶³), Dietrich; Dune (1993⁶⁴), Montgomery; Dietrich (1989⁶⁵) e Coelho Neto *et al.* (1995⁶⁶), que ressaltam o papel da forma como elemento representativo para o estudo dos elementos que atuam no sistema vertente.

Em trabalho voltado à cartografia de formações superficiais, Oka-Fiori (1980) evidência a importância dos elementos de relevo (e drenagem) na interpretação das condições superficiais do modelado. Através da aplicação da técnica de foto-leitura (SOARES; FIORI, 1976), é possível interpretar diferentes

⁵⁹ GLOCK, W.S. The development of drainage system: s synoptic view. *Geography Review*, 21: 475-482, 1931.

⁶⁰ HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America Bull.* n.56. 1945.

⁶¹ WOLMAN, M.G., MILLER, J.P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic process. Chicago: *Journal of Geology*, n.68. 311 p. 1960.

⁶² YOUNG, A. Slopes. *Geomorphology text* n.3. London: Longman Group Limited. 288 p. 1972.

⁶³ BEVEN, K., KIRKBY, M. J. (ed). *Channel network hydrology*. New York: John Wiley & Sons, 1993. 582 p.

⁶⁴ DIETRICH, W. E. & DUNNE T. The channel head. in K. Beven and M. J. Kirkby (Eds.), *Channel Network Hydrology*, J. Wiley and Sons, 1993.

⁶⁵ MONTGOMERY, D.R, DIETRICH, W.E. Source areas, drainage density, and channel initiation. *Journal of the American Water Resources Association*. 25. New York, 1989.

⁶⁶ COELHO NETO, A.L. et al. Ciclos recentes de erosão – sedimentação na bacia do rio Bananal (SP/RJ): um estudo integrado dos processos atuais e estratigrafia dos depósitos fluviais e de encostas. In: *Anais do I Encontro de Geomorfologia do Sudeste Rio de Janeiro*: Ed. IGEO. 1995.

condições de permeabilidade, a partir das variações da densidade do traçado da rede de drenagem. Por sua vez, o padrão de arranjo dos cursos d'água se relacionam à presença de estruturas geológicas. A autora identifica a presença de formações superficiais sobre o substrato geológico, através da delimitação de zonas homólogas de relevo, onde são evidenciadas que estas formações ocorrem com textura homogênea, sem ruptura de declive com o substrato, com rede de drenagem escassa e se mostram com tonalidade clara nas fotografias aéreas em branco e preto. A análise qualitativa da rede de drenagem que subsidiou o mapeamento das formações superficiais, com base em Soares; Fiori (1976), é fundamentada na avaliação da densidade, angularidade, sinuosidade, tropia, assimetria e formas anômalas da rede de drenagem. Uma vez que há relação direta entre as condições da rede de drenagem e do relevo, no trabalho ora apresentado são feitas interpretações análogas àquelas de Oka-Fiori (1980).

Com base nestes trabalhos fica clara a importância da caracterização das formas de relevo atuais para a construção de um modelo geológico/geomorfológico que contemple o caráter evolutivo da paisagem. Neste modelo, conceitual, a interação pretérita e atual entre as rochas, estruturas e processos resulta em diferentes compartimentos da paisagem, denominados de Unidades de Paisagem Geomórficas (UPG), onde os processos atuantes e os graus de fragilidade ambiental, entre outros, são distintos. A delimitação das diferentes UPGs apresenta-se como relevante, em especial, para a gestão territorial, pois fornece parâmetros técnicos para a determinação de usos compatíveis às restrições/fragilidades locais. Romstad (2001) alerta para a questão de que os atributos que caracterizam as UPGs, sobrepostos no espaço geográfico, apresentam variação espacial distintas, em taxas e direções de tendência diferentes entre si, o que leva à ausência de coerência nos resultados automatizados. Como sugestão a trabalhos futuros nesta linha de pesquisa, indica que as abordagens sejam mais abrangentes,

através do cálculo dos atributos para cada unidade de relevo, usando também a integração das diferentes variáveis.

No que diz respeito à interpretação de dados de sensores remotos para fins geomorfológicos, Duarte; Assad (2007⁶⁷) e Silva; Santos (2007⁶⁸) citados por Sampaio (2008) ressaltam a elevada viabilidade de uso de modelos digitais de elevação do terreno provenientes de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Tais dados estão disponíveis gratuitamente e contemplam cerca de 80% da superfície emersa da Terra, o que levou a uma rápida difusão de usos e aplicações, desde o início do século XXI. No que tange o escopo deste trabalho, Duarte e Assad (*op cit.*) testaram a aplicabilidade dos dados SRTM para estudos geomorfológicos e concluíram que estes são fiéis até a escala de trabalho de 1:50.000, quando comparados com bases topográficas tradicionais (cartas). Entretanto, a comparação das diferenças altimétricas entre pontos de controle em campo e dados do sensor SRTM, realizada por Oliveira; Paradella (2008), revela que tais dados estão adequados a estudos geomorfológicos em relevos suave a acidentados, até a escala de semi-detalle (1:100.000), conforme norma da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR). Uma vez que os dados altimétricos do sensor SRTM serão utilizados para caracterização do relevo, e não para geração de material cartográfico altimétrico, optou-se por aceitar eventuais erros de acurácia da informação para sua aplicação na escala de 1:50.000.

A inclusão de dados remotos adicionais, provenientes de fontes diferentes, como por exemplo, imagens orbitais multi-espectrais, fornece elementos que contribuem para uma melhor caracterização das formas de relevo, por apresentarem feições compatíveis com as formas do modelado. No Brasil é grande a disponibilidade de imagens multi-espectrais gratuitas,

⁶⁷ DUARTE G.G.F; ASSAD, M.L.L. Avaliação de MDE obtidos por meio de SRTM. In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis, Brasil, INPE. 2007.

⁶⁸ SILVA, J.E.B.; SANTOS, P.R.A. A utilização dos modelos SRTM na interpretação geomorfológica: técnicas e tecnologias aplicadas ao mapeamento geomorfológico do território brasileiro. in: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis, 2007, INPE p. 4261-4266.

distribuídas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), abrangendo praticamente todo o território brasileiro e constituídas por cenas obtidas em várias épocas. Destacam-se dois sensores: CBERS (em inglês, Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) e LANDSAT (em inglês, Satélite de Sensoriamento Remoto Terrestre), cujas características técnicas (em especial a resolução espacial) são compatíveis com a integração aos dados altimétricos SRTM (BATISTA *et al.*, 2005; BOULHOSA; SOUZA FILHO, 2005; SILVA; AMARO, 2008).

10. Trabalhos desenvolvidos

10.1. *Processamento dos atributos descritores do relevo*

Conforme a proposta metodológica apresentada, inicialmente foi estabelecido que os testes do desenvolvimento da metodologia seriam aplicados nas bacias hidrográficas dos rios Barigui e Passaúna, afluentes da margem direita do rio Iguaçu na região de Curitiba, com uma escala de trabalho de 1:50.000. Embora tenha sido verificado que a aplicação de dados SRTM (NASA, 2010) para geração de cartas topográficas seja adequada apenas para uso em escalas iguais ou menores que 1:100.000 (OLIVEIRA; PARADELLA, 2008), conforme indicação da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR), optou-se por utilizá-los na escala de 1:50.000, uma vez que os valores não foram utilizados para identificação altimétrica de um ponto ou interpolação de uma curva, mas para a caracterização de uma população de pontos. Isto se dá porque na presente abordagem a acurácia *per se* não representa fator condicionante à sua aplicação. Os atributos derivados do modelo digital de elevação do terreno (MDET), embora com acurácia altimétrica um pouco reduzida nesta escala, mantém suas relações espaciais (p.ex. declividade, curvatura). Também para teste do método de interpretação geomorfométrica de parâmetros variográficos do relevo a acurácia em função da escala não é limitante de sua aplicação, uma vez que este método se baseia na independência da escala de trabalho, um dos princípios de fotointerpretação geológica apresentados por Soares; Fiori (1976).

Após a aquisição na forma de uma malha regular (celas com cerca de 90m de lados), os dados altimétricos do sensor SRTM foram processados no aplicativo Surfer 9 (GOLDEN SOFTWARE, 2010), também na forma de malhas regulares de forma a obter algumas propriedades elementares do relevo. Foram derivados, automaticamente neste aplicativo os seguintes atributos descritores do relevo: hipsometria (FIGURA 11), declividade (FIGURA 12), e formas das encostas (curvatura em planta e em perfil - FIGURA 13 e FIGURA 14), funções disponíveis na maioria dos aplicativos de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

10. Trabalhos desenvolvidos

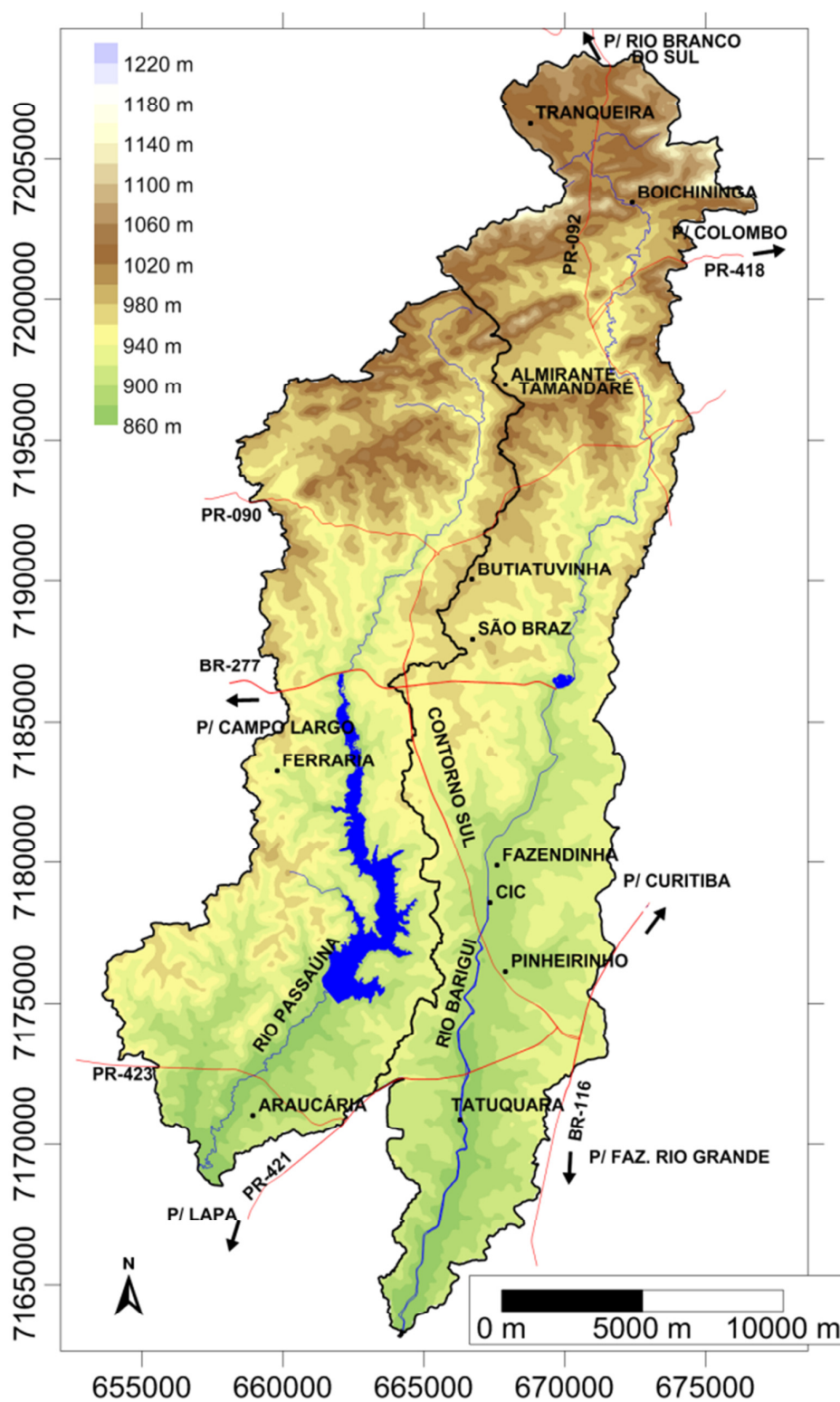


FIGURA 11. Mapa hipsométrico das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigüi, a partir dos dados SRTM-NASA.

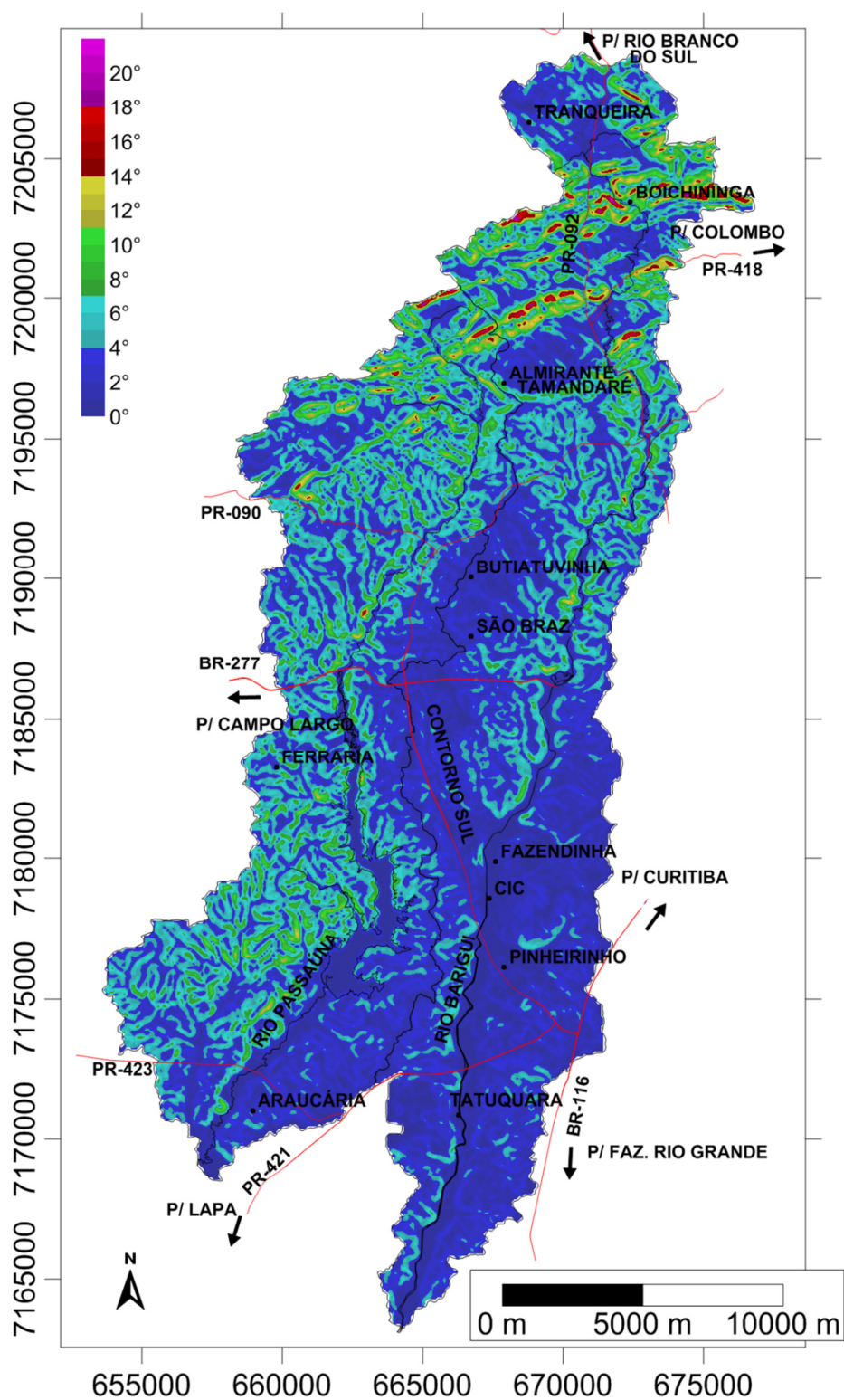


FIGURA 12. Mapa de declividades do terreno das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.

10. Trabalhos desenvolvidos

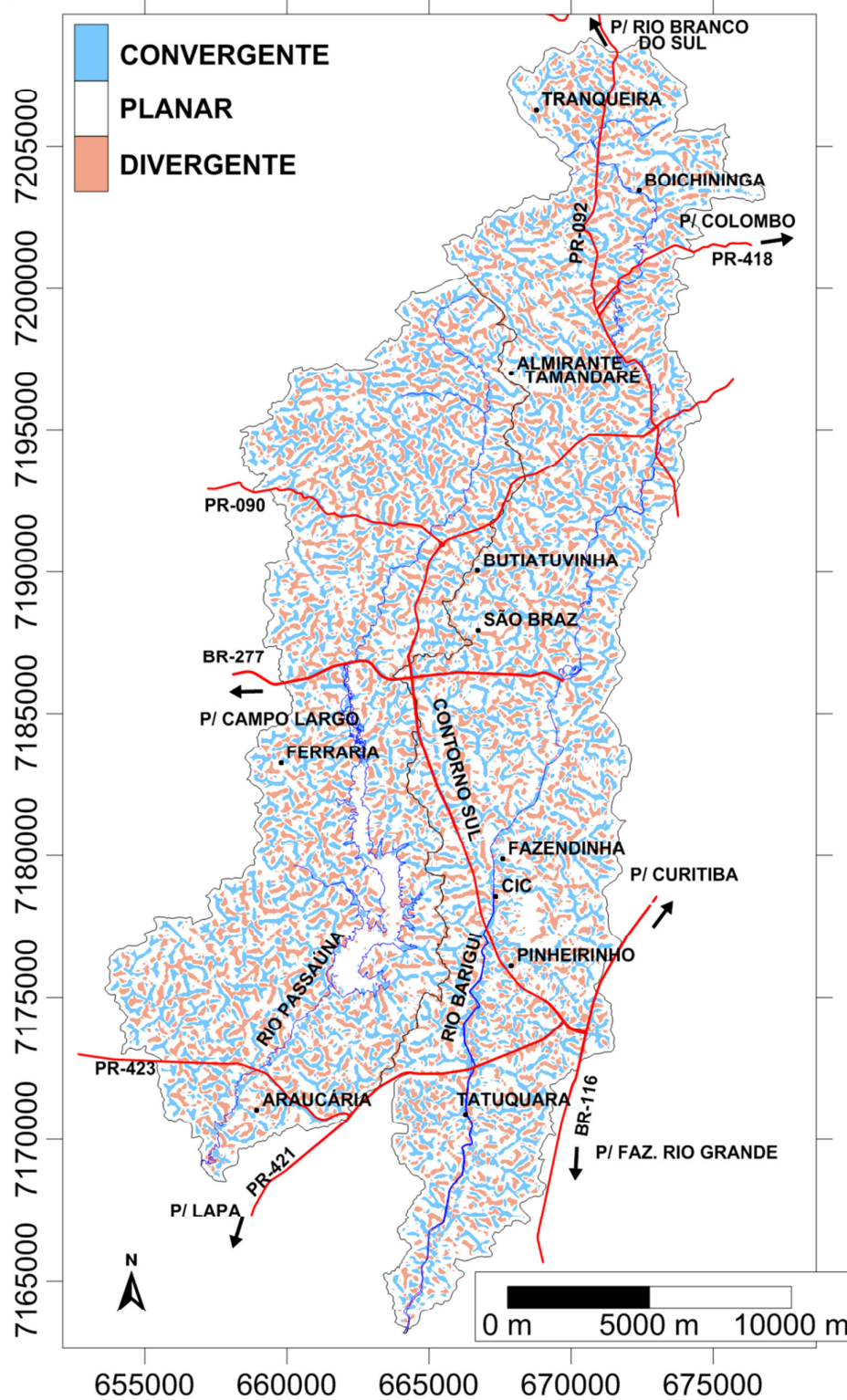


FIGURA 13. Mapa de forma das encostas (curvatura em planta) das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.

10. Trabalhos desenvolvidos

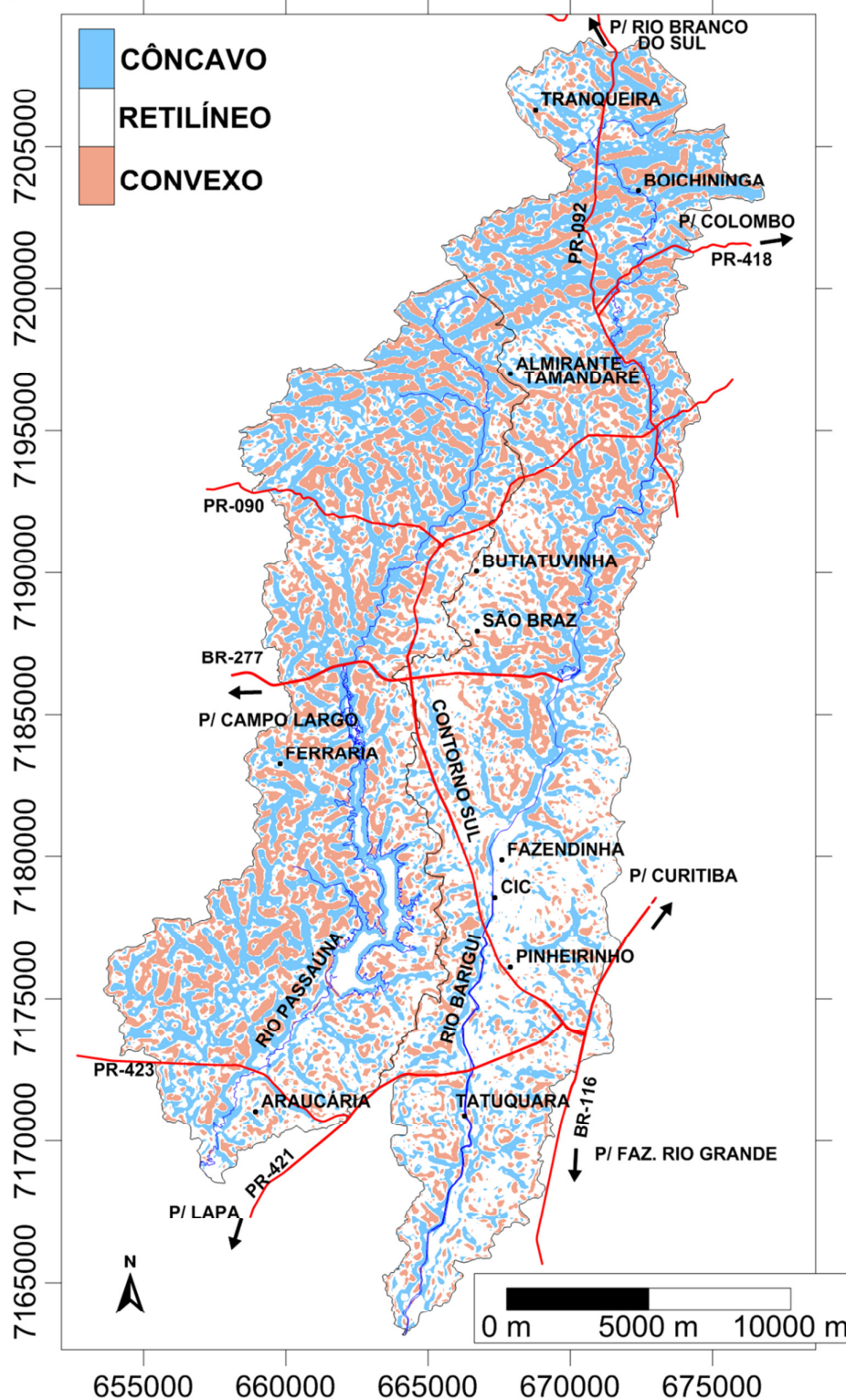


FIGURA 14. Mapa de forma das encostas (curvatura em perfil) das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.

Para fins de desenvolvimento metodológico foi realizado um teste morfológico sobre os dados altimétricos, de modo a identificar a dimensão mais apropriada das celas para a integração dos atributos geomorfométricos. Para

10. Trabalhos desenvolvidos

tanto foi escolhido o setor norte da área de pesquisa, onde ocorre relevo mais acentuado e as distâncias entre os interflúvios são mais curtas. Com base nos dados altimétricos deste setor foi construído um variograma (FIGURA 15), com passos de 180m e distância máxima dos passos de 2200m. Testadas diversas direções, verificou-se que na direção NW-SE (mostrada na FIGURA 15), perpendicular às estruturas geológicas que controlam o relevo, ocorre claramente um efeito buraco (ou onda) no variograma experimental, com primeiro ápice da variância em cerca de 720m. Foi interpretado que esta distância representa, portanto, o comprimento (em planta) médio das vertentes mais recorrentes neste setor.

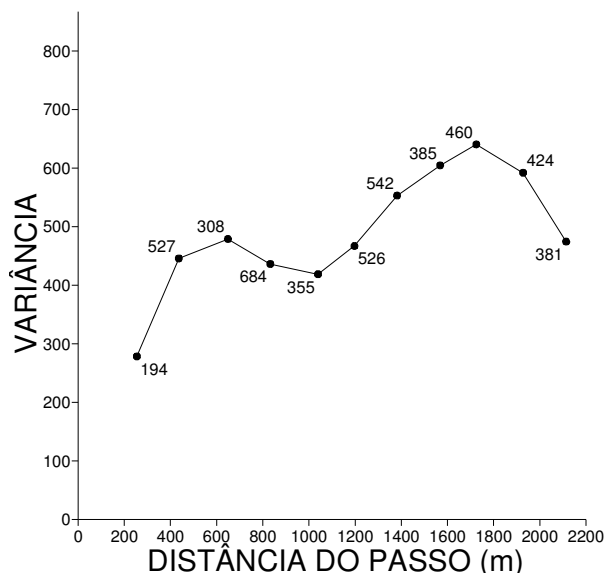


FIGURA 15. Variograma dos valores altimétricos do setor norte da área de pesquisa (relevo mais acentuado). Distância máxima dos passos 2200m. Passos com 180m. Primeiro pico da variância em aproximadamente 720m. Construído na direção com maior variância: NW-SE.

Com base na dimensão das vertentes, verificadas no variograma, optou-se por assumir a cartografia das UPGs em uma malha formada por celas quadradas com 720m de lados, num total de 926 celas, entendendo que estas contemplam um conjunto consistente de pontos, pixels ou nós de cada atributo (pixel de 30m – Landsat – e de 90m de lados - SRTM) e são compatíveis com a dimensão das vertentes presentes. Nestas condições, para cada cela investigada foram calculados os atributos com base em um conjunto de 64 pontos (ou nós) para os dados SRTM (8 x 8 celas) e 576 pontos para os dados

10. Trabalhos desenvolvidos

provenientes do sensor TM do Landsat 5 (24 x 24 células). Admite-se então que uma célula de 720 x 720m pode representar as feições de uma unidade elementar de relevo e uma associação destas unidades onde as mesmas propriedades se repetem constitui uma zona homóloga de relevo que, por conseguinte, se revela como uma unidade de paisagem geomórfica.

Os atributos derivados diretamente do MDET apresentavam, originalmente, células com as mesmas dimensões dos dados de entrada, ou seja, quadradas com 90m de lado. Estes foram então reamostrados pelo algoritmo de média móvel, de modo a compor uma malha regular com células quadradas de lados medindo 720m, dimensão desejada para a cartografia das UPGs.

Sobre os dados espectrais provenientes de um setor de uma cena Landsat 5, após realizada a fusão em um único arquivo multiespectral e que manteve sua geometria original (cena completa), ou seja, com células (*pixels*) quadradas de lados medindo 30m, foi realizado um recorte da área de interesse. Assim foi selecionado um retângulo envolvente que englobou a área de pesquisa. Tal medida foi adotada visando a redução do tamanho do arquivo digital, desta forma reduzindo o tempo de processamento dos atributos, sem prejuízo das informações espectrais, já que não houve alterações nos números digitais das bandas escolhidas.

Através do processamento da cena multiespectral no aplicativo MultiSpec (*Multispectral Image Data Analysis System - Copyright® 1994-2012 Fundação de Pesquisa da Universidade de Purdue*), foram calculados dois índices relacionados às condições da vegetação presente na área: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index - NDVI*) e Índice de Umidade por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index - NDWI*). Indiretamente a geração e interpretação destes índices permitiu avaliar a influência antrópica na paisagem natural, através da delimitação de zonas com vegetação mais densa, em contraste com áreas com pouca ou nenhuma vegetação (áreas urbanas).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, normalmente referido pela sigla NDVI, resulta do cálculo da diferença entre a reflectância na faixa do infravermelho próximo (banda espectral TM 4) e no visível (banda 3), sobre a relação dessas reflectâncias, conforme a equação abaixo (Tucker, 1979).

$$NDVI = \frac{IVP(B4) - VIS(B3)}{IVP(B4) + VIS(B3)} \quad (10)$$

Onde: NDVI é o índice de vegetação; IVP e VIS são, respectivamente, as faixas do espectro do infravermelho próximo e do vermelho visível.

Este método é baseado na característica da absorção de radiação solar na região do vermelho (visível) por plantas verdes que usam a radiação como fonte de energia para realizar a fotossíntese. No outro extremo, a radiação na faixa do infravermelho próximo é fortemente refletida pela clorofila de células vegetais, sobretudo foliares, já que a energia neste domínio não sintetiza moléculas orgânicas. Desta forma a combinação entre as duas faixas de comprimentos de onda (bandas) permite distinguir a densidade de vegetação verde com vida (FIGURA 16).

Valores elevados de NDVI representam zonas cobertas por vegetação adensada, como remanescentes florestais nativos ou em estágios avançados de recuperação (verde escuro). Em contraste, os tons rosa representam zonas com baixa densidade ou mesmo ausência de vegetação, como ocorre em áreas fortemente urbanizadas.

De forma semelhante, o Índice de Umidade por Diferença Normalizada, ou NDWI (FIGURA 17), permite estimar o teor de umidade da vegetação, através da comparação entre as reflectâncias das faixas do infravermelho próximo (banda 4 do TM) e infravermelho médio (banda 5), conforme proposto por Gao (1996) e representado pela equação abaixo. Relaciona-se o NDWI com o conteúdo de água presente nas folhas, onde os valores negativos da relação de reflectância representam áreas com vegetação seca ou massa foliar caducifólia e valores positivos para áreas com vegetação verde, clorofilianamente ativa.

10. Trabalhos desenvolvidos

$$NDWI = \frac{IVP(B4) - IVM(B5)}{IVP(B4) + IVM(B5)} \quad (11)$$

Onde: NDWI é o índice de umidade; IVP e IVM são, respectivamente, as faixas do espectro do infravermelho próximo e médio.

Atributos derivados dos dados dos sensores Landsat 5 (*Multispectral Scanner* e *Thematic Mapper*), originalmente com celas quadradas com 30m de lado, foram processados e calculados nestas mesmas dimensões (NDVI e NDWI) e depois reamostrados por meio da aplicação de filtro de média móvel para compor celas quadradas com as dimensões finais (720m de lado), visando a integração com os demais atributos descritores do relevo.

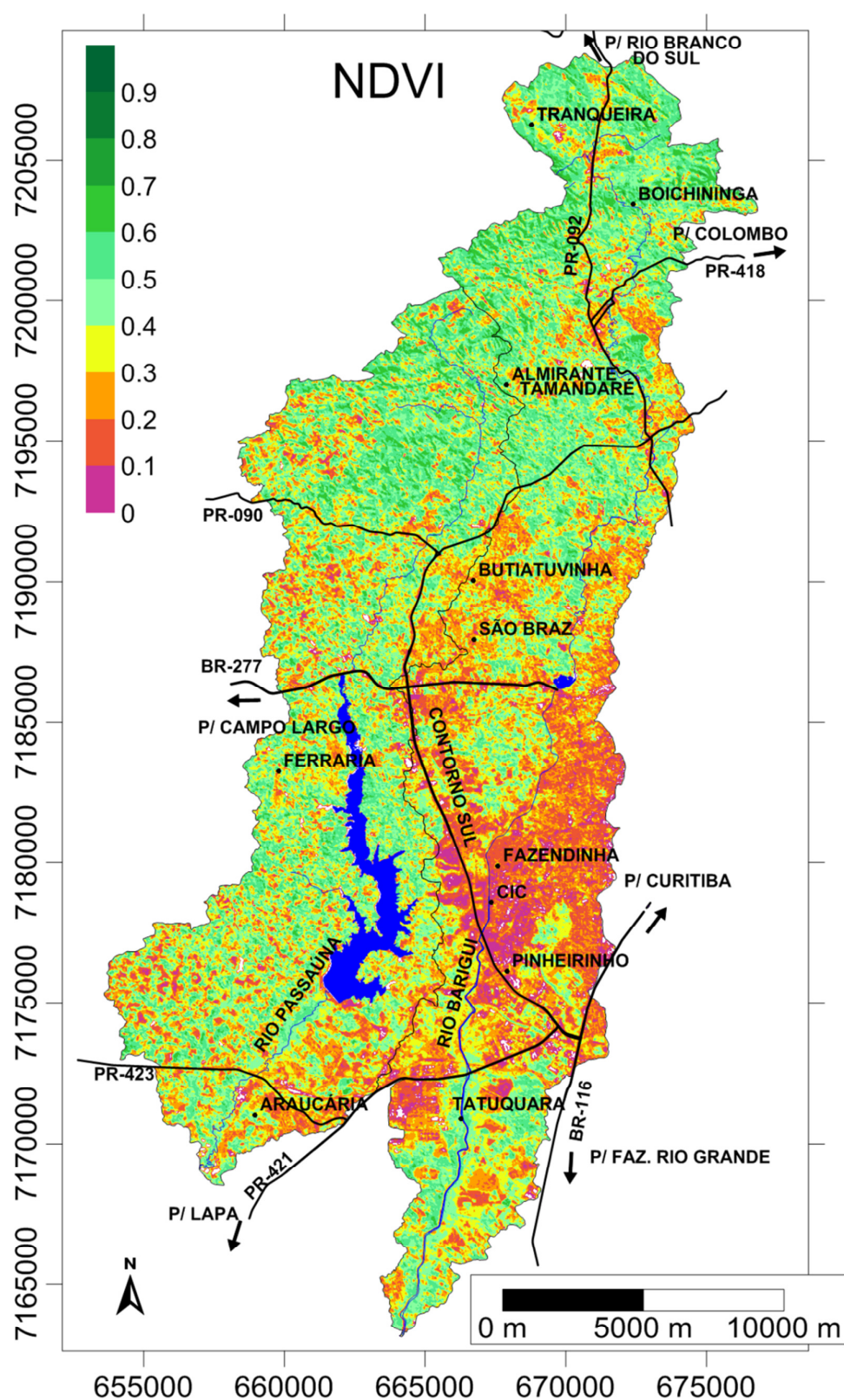


FIGURA 16. Mapa do índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI – das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.

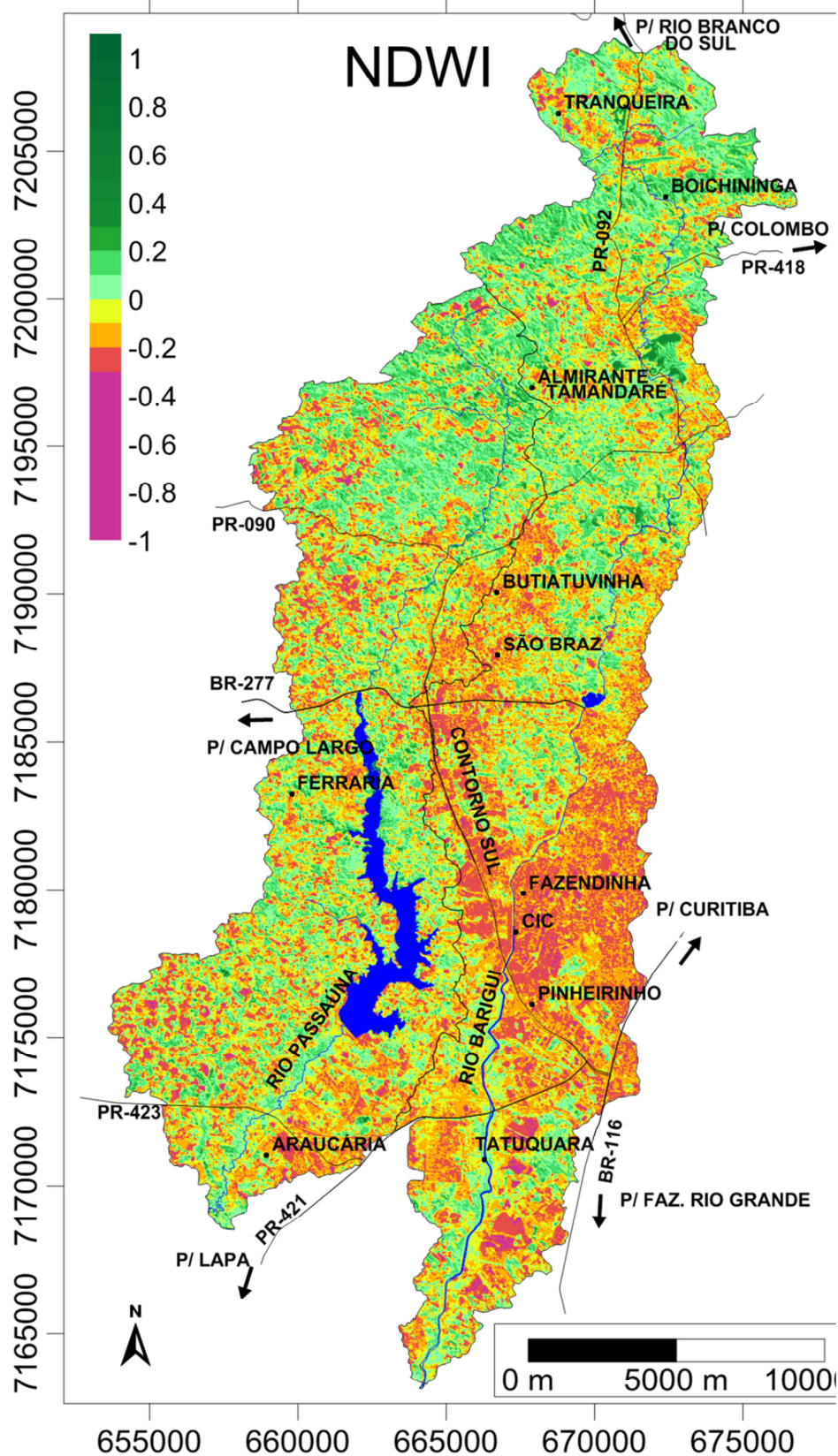


FIGURA 17. Mapa do índice de umidade por diferença normalizada – NDWI – das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.

10.2. Análise geomorfométrica com parâmetros geoestatísticos do relevo

Ainda com base nos dados do MDET foram derivados atributos geomorfométricos complementares. Através de um aplicativo de Análise de Relevo (REL_AN.EXE de Soares, 2011b), desenvolvido em linguagem Turbobasic®, foram estimados os índices de anisotropia e direção de anisotropia, rugosidade, dimensão fractal, densidade e angulosidade do relevo.

Destaca-se que os cálculos empregados para a derivação de tais atributos independem da escala dos dados de entrada, ou seja, são adimensionais, de forma análoga às técnicas de fotointerpretação geológica apresentadas por Soares; Fiori (1976). Esta condição resulta na possibilidade de cálculo destes atributos geomorfométricos para escalas que vão desde modelos escalares laboratoriais até feições continentais, desde que a resolução dos dados de entrada seja compatível com o fim pretendido.

Operacionalmente os cálculos são realizados internamente a uma janela móvel, no entorno de cada nó em uma malha regular, com base na semivariância direcional dos valores de altitude vizinhos. Tal janela deve ter dimensões pré-estabelecidas e permite que os resultados obtidos com base na semivariância altimétrica sejam referentes apenas aos arredores de cada cela. Uma descrição mais detalhada do conceito aplicado para o cálculo dos atributos geomorfométricos a partir de semivariogramas regionalizados é apresentado em Bettú; Soares (no prelo), sendo reproduzido completamente no Anexo I.

De forma similar ao que apresentaram Pedroso *et al.* (1998) e Martins (2005), que utilizam a análise variográfica para classificação textural em imagens orbitais, assim como Mela e Louie (2001) que aplicaram a metodologia desenvolvida por Carr (1995) para cálculo da dimensão fractal, a modelagem da semivariância altimétrica multidirecional permite interpretar atributos geomorfométricos. Em uma nova abordagem metodológica, Bettú; Soares (no prelo – Anexo 1) propõem procedimentos analíticos para estimativa de atributos geomorfométricos adimensionais, a partir da semivariância

10. Trabalhos desenvolvidos

altimétrica em um conjunto de celas no interior de uma janela móvel, em função da distância, ou função semivariograma.

Com base nos parâmetros variográficos, como efeito pepita, anisotropia direcional, alcance, variância e modelo teórico ajustado, são apresentados os índices de relevo: rugosidade (IRR), densidade (IDR), anisotropia (IAR) e direção de anisotropia, e de angulosidade (IAN), além do cálculo da dimensão fractal (DF).

Através de uma janela móvel de dimensões estabelecidas a partir do alcance do semivariograma omnidirecional, representada por um ponto central de uma dada cela de uma malha regular, conforme mostrado na FIGURA 18, é realizado o cálculo da semivariância entre os diversos pares de valores existentes, para diferentes distâncias de passos. Como resultados são gerados semivariogramas direcionais e omnidirecional representativos do entorno de cada cela. Depois de concluída a leitura dos pares e construídos os semivariogramas para uma cela, o aplicativo move a janela na distância equivalente a uma cela e refaz os cálculos para o novo ponto (nova cela – FIGURA 18-2). Esta sucessão de cálculos é feita para todas as celas da malha, até que a última janela alcance o limite dos dados, resultando em semivariogramas direcionais e multidirecionais para cada cela, os quais permitem interpretação dos atributos geomorfométricos de seu entorno.

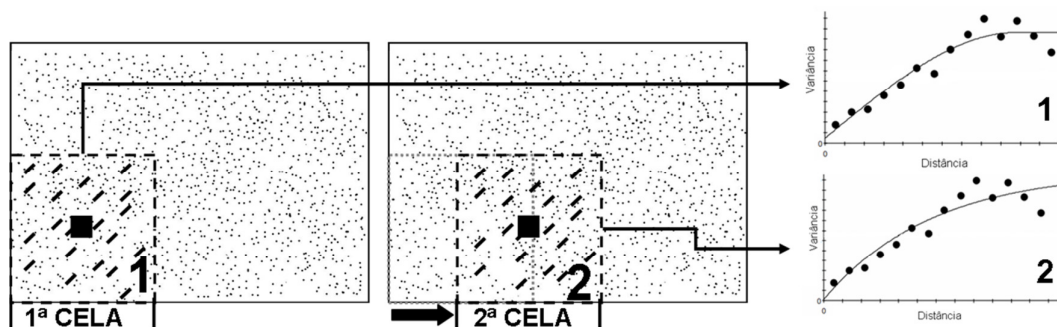


FIGURA 18. Exemplo da sucessão de cálculos da semivariância direcional em janelas móveis e os semivariogramas gerados para cada cela (neste caso para a direção N45°).

10. Trabalhos desenvolvidos

10.2.1. Índice de rugosidade do relevo (IRR)

Conforme apresentado por Hobson (1972⁶⁹, citado por GROHMANN *et. al*, 2009) a rugosidade do relevo é relacionada à distribuição espacial da declividade, ou seja, sua concentração ou dispersão através de uma determinada área. No conceito de Christofolletti (1980), o Índice de rugosidade combina as qualidades de declividade e comprimento das vertentes com a densidade de drenagem, expressando-se como número adimensional que resulta do produto entre a amplitude altimétrica e a densidade de drenagem. Sampaio (2009) apresentou o Índice de Concentração da Rugosidade, fazendo uso de princípios geoestatísticos sobre valores indiretos da rugosidade, bem como do entalhamento do relevo (ROSS, 1992⁷⁰, citado por SAMPAIO, 2009), a partir da análise da repetição dos valores de declividade por unidade de área.

Na natureza, a rugosidade do relevo pode ser compreendida como a expressão da variação altimétrica no entorno de um determinado ponto. Quanto maior a dispersão dos valores de elevação no entorno deste ponto, maior será a rugosidade do relevo, e conseqüentemente maior será a semivariância altimétrica. Soares; Fiori (1976) consideraram esta característica como micro-relevo e a interpretam como o resultado da presença de solos descontínuos e substrato rochoso com elevada resistência ao intemperismo químico. Nas fotos aéreas e imagens espectrais, sobretudo no infravermelho próximo, esta feição aparece como sensível diferença entre um elemento textural ou espectral (pixel) e seus vizinhos.

Na proposta de Bettú; Soares (no prelo – Anexo 1) a rugosidade é proporcional ao efeito pepita do semivariograma experimental, conforme exemplificado na FIGURA 19. Esta relação se justifica uma vez que o efeito pepita representa a micro-variância, ou seja, a semivariância encontrada entre valores separados por distâncias muito menores que os passos usados na construção do semivariograma. Terrenos com elevada rugosidade, portanto,

⁶⁹ HOBSON, R. D. Chapter 8 - surface roughness in topography: quantitativ e approach. Pages 221-245 in CHORLEY, R. J., ed. Spatial analysis in geomorphology. Harper & Row, New York, New York, USA. 1972.

⁷⁰ ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. Revista do Departamento de Geografia, n. 6, 1992.

10. Trabalhos desenvolvidos

quando avaliados na forma de um variograma experimental, apresentarão maiores valores para o efeito pepita quando comparados a áreas mais suaves.

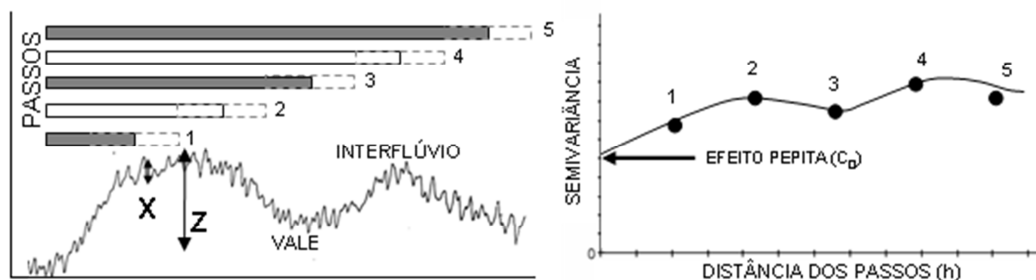


FIGURA 19. Efeito da rugosidade na construção de um semivariograma com a distância do primeiro passo maior que zero. Enquanto as variações altimétricas de grande amplitude (Z) são representadas nos passos do semivariograma, amplitudes menores que o limite mínimo de tolerância do primeiro passo (janela tracejada), como o caso da rugosidade do relevo (X), são englobadas como parte do efeito pepita. (BETTÚ: SOARES, no prelo – Anexo 1)

10.2.2. Índice de angulosidade do relevo (IAN)

O Índice de Angulosidade do Relevo (IAN) foi desenvolvido visando representar a suavidade das rupturas de declive predominantes na paisagem. Trata-se de uma medida da suavidade das transições entre as diferentes geoformas (p.ex. entre uma encosta e a planície aluvionar), refletida na continuidade dos passos iniciais da função semivariograma.

Verificou-se que o IAN permite quantificar as heterogeneidades das geoformas, melhorando com isso a caracterização do relevo, em complemento ao índice de coeficiente de massividade, conforme apresentado por Christofolletti (1980).

O coeficiente de massividade (C_m), como difundido e aplicado em trabalhos de análise morfométrica, é resultante do quociente da divisão da altura média do relevo da área de uma bacia (A_m) pela sua superfície (A), do modo apresentado por Christofolletti (1980) e sintetizado nas equações mostradas a seguir:

$$C_m = A_m/A \quad (12)$$

$$C_o = A_m * C_m \quad (13)$$

Onde C_m é o Coeficiente de Massividade; A_m e A são, respectivamente, a altura média e a área da bacia; e C_o corresponde ao Coeficiente Orográfico.

10. Trabalhos desenvolvidos

Este coeficiente é associado ao coeficiente orográfico (Co), que representa a combinação do valor da altura média da bacia (Am) e o valor do coeficiente de massividade (Cm), sendo importante parâmetro para a compreensão do micro-relevo da bacia.

Sob a ótica da variação altimétrica na transição entre as geoformas, ou seja, de quão abruptas são as rupturas de declive, é apresentado o Índice de Angulosidade do Relevo (IAN). O IAN foi desenvolvido de modo a diferenciar compartimentos geomórficos, independentemente do coeficiente de massividade (Cm) presente. Assim, áreas com coeficientes de massividade diferentes, mas com feições de relevo semelhantes, tendem a apresentar IAN também semelhantes, já que as rupturas de declive mantêm-se morfologicamente idênticas.

A comparação de três relevos hipotéticos (parte superior da FIGURA 20), todos com uma mesma amplitude altimétrica, permite compreender a lógica empregada no cálculo do IAN. O primeiro relevo, à esquerda, é marcado por uma sucessão de vertentes côncavo-convexas (curva senoidal). O relevo representado na porção central da FIGURA 20 é constituído por terrenos aplainados com remanescentes (*inselbergs*) convexos, enquanto à direita o relevo mostrado é também aplainado, porém com remanescentes predominantemente côncavos.

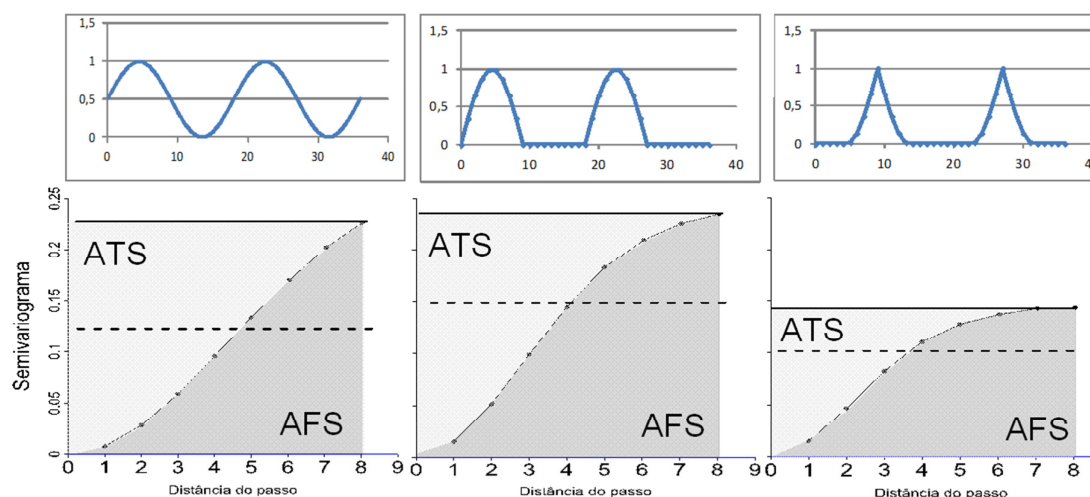


FIGURA 20. Relevos hipotéticos e respectivas funções semivariogramas. À esquerda: predomínio de vertentes côncavo-convexas sucessivas. No meio: relevo aplainado com remanescentes convexos; e à direita: relevo aplainado com remanescentes côncavos. A linha horizontal cheia é a semivariância máxima e a linha horizontal pontilhada é a semivariância média. ATS é a área total do semivariograma e AFS é a área da função semivariograma.

10. Trabalhos desenvolvidos

O cálculo do IAN é fundamentado na razão entre a área delimitada sob a função semivariograma omnidirecional (AFS) e a área total do semivariograma (ATS), conforme apresenta a equação (14):

$$\text{IAN} = (\text{AFS} / \text{ATS}) \quad (14)$$

Onde IAN é o índice de angulosidade do relevo, AFS é a área da função semivariograma e ATS é a área total do semivariograma.

Uma vez que as duas áreas do semivariograma, ATS e AFS, representam respectivamente o produto das semivariâncias máxima e média pela distância do último passo usado na construção do semivariograma (8º passo na FIGURA 20), é possível calcular o IAN apenas através da razão entre as duas semivariâncias (máxima e média).

De modo a eliminar a influência da amplitude altimétrica (responsável pela magnitude das variâncias máxima e média) no cálculo do IAN foi usado o artifício da normalização das semivariâncias pela semivariância máxima. Assim foi retirada do procedimento de cálculo qualquer influência do coeficiente de massividade de Christofolletti (1980).

Nota-se que para o primeiro relevo (FIGURA 20 – esquerda), bastante suavizado quanto às rupturas de declive, ou seja, com baixa angulosidade, a semivariância média é de cerca de metade da semivariância máxima, refletindo uma razão próxima 0,5. No caso do relevo aplainado com remanescentes convexos (FIGURA 20 – centro) semivariância média se aproxima da semivariância máxima, embora a razão entre a primeira e a segunda ainda se mantenha significativa, em cerca de 0,62. No último exemplo (FIGURA 20 – direita), o relevo aplainado com remanescentes côncavos apresenta valores mais próximos entre as semivariâncias média e máximas, com razão entre as duas em cerca de 0,7.

Já que na construção dos semivariogramas são usados os valores quadráticos da semivariância, para cálculo do IAN é necessário extrair a raiz quadrada das razões entre as semivariâncias. Assim os IAN para os exemplos mostrados na FIGURA 20 são, na ordem, 0,72, 0,79 e 0,84.

10. Trabalhos desenvolvidos

10.2.3. Índice de densidade de relevo (IDR)

O índice de densidade de relevo (IDR) se refere à quantidade de feições de relevo individuais, tais como cristas e vales, por unidade de área. Usualmente a densidade de relevo é avaliada através da densidade de drenagem já que ambas estão diretamente relacionadas. Trata-se de um atributo geomorfométrico condicionado pelas características de escoamento (ou infiltração) da água no terreno. Em relevo fluvial, densidades de drenagem/relevo altas indicam predomínio de solos impermeáveis, onde prevalece o escoamento superficial em detrimento à infiltração. Em contraste, menores densidades de relevo/drenagem ocorrem em condições de alta permeabilidade do solo/rocha.

Quanto maior a densidade de relevo, mais esculpido é o modelado, ou seja, há uma sucessão súbita, no espaço, entre vales e interflúvios, com amplitudes altimétricas menores e menores distâncias entre os vales e interflúvios sucessivos, quando comparado a relevos menos adensados (FIGURA 21). Segundo Bettú; Soares (no prelo – Anexo 1), o cálculo da densidade de relevo é baseado na determinação do comprimento planar médio multidirecional das vertentes (CMV), que é representado no semivariograma pelo alcance, que reflete a distância onde ocorrem os maiores contrastes altimétricos (distância entre vales e interflúvios sucessivos). Na FIGURA 21 são exibidos dois mapas hipotéticos (mesma escala), seguidos por seus respectivos semivariogramas altimétricos. O exemplo à esquerda mostra a menor densidade de relevo, em comparação com o exemplo à direita.

Conforme descrevem Bettú; Soares (no prelo – Anexo 1), o CMV é calculado através da determinação do alcance do primeiro valor da semivariância máxima (γ_M) nestes semivariogramas. Para relevos com elevadas densidades, a semivariância máxima é alcançada logo nos primeiros passos, refletindo um baixo valor de CMV (FIGURA 21 – direita). Em contraste, relevos com baixa densidade apresentam a semivariância máxima em passos mais longos, ou seja, o CMV é maior.

Como artifício de cálculo, a projeção em planta dos CMVs (círculos na FIGURA 21) é circunscrita em um quadrado (de lados medindo duas vezes o CMV), cuja área é comparada a uma área pré-determinada, 1km^2 no exemplo.

10. Trabalhos desenvolvidos

A divisão da área de comparação (1km^2) pela área do quadrado resulta no índice de densidade de relevo (IRR), ou unidades de relevo por km^2 . Invertendo o valor do índice, obtém-se a dimensão média das unidades de relevo.

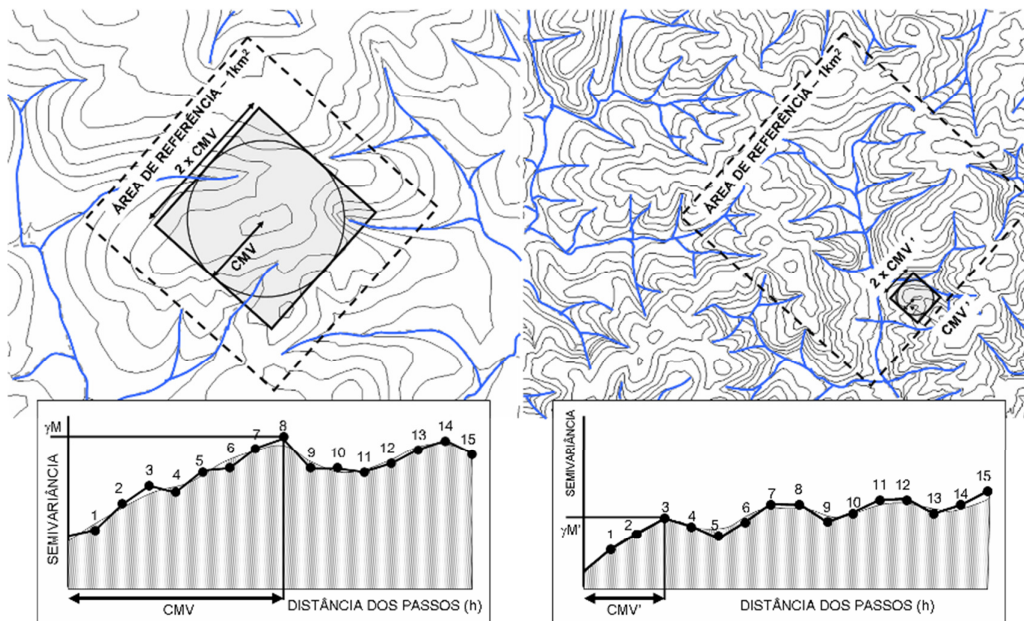


FIGURA 21. Lógica para cálculo da densidade de relevo (DR). Os comprimentos planares médios das vertentes (CMV e CMV') são proporcionais à metade do lado do quadrado circunscrito à sua projeção em planta (círculos – área média das unidades de relevo). Para cálculo da DR, relaciona-se a área média das unidades de relevo a uma área de pesquisa com dimensão pré-estabelecida (quadrado tracejado), p.ex. 1Km^2 .

10.2.4. Índice de anisotropia de relevo (IAR) e direção de anisotropia

Anisotropia, conforme definido inicialmente por Soares; Fiori (1976) é a característica da orientação preferencial das formas de relevo, e pode refletir as condições de alguma estrutura geológica que pode estar controlando o relevo, como acamamento, fraturamento, foliação, gnaissificação e/ou xistosidade na rocha. Maciços ígneos (quando não fraturados) são isotrópicos por natureza, portanto não apresentam orientação das formas de relevo. Formações sedimentares e complexos metamórficos são anisotrópicos devido à presença de estratificação/foliação/gnaissificação/xistosidade, e apresentam relevo e drenagem alinhados.

Com base no conceito inicialmente desenvolvido para interpretações fotogeológicas (SOARES; FIORI, 1976) ou sobre imagens de satélite, diz-se

10. Trabalhos desenvolvidos

que o relevo possui anisotropia alta quando existir lineações positivas e negativas (em feixe) com proporções semelhantes e em grande quantidade. Anisotropia moderada ocorre quando há predomínio das lineações negativas em feixe sobre as positivas; anisotropia baixa significa que as lineações são poucas, e nula quando não existem lineações.

Bettú; Soares (no prelo – Anexo 1) propõem que a anisotropia do relevo pode ser calculada por meio do contraste entre o comprimento planar médio multidirecional das vertentes (CMV) e o maior valor do comprimento planar médio das vertentes (CPV), como mostrado na FIGURA 22. O CPV é calculado por meio da construção de semivariogramas altimétricos experimentais em várias direções. Desta forma a semivariância altimétrica é avaliada de forma independente para diferentes direções, mostrando tendências direcionais também diferentes (caso se trate realmente de um relevo anisotrópico), diferentemente do CMV, que representa o comportamento da semivariância para todas as direções.

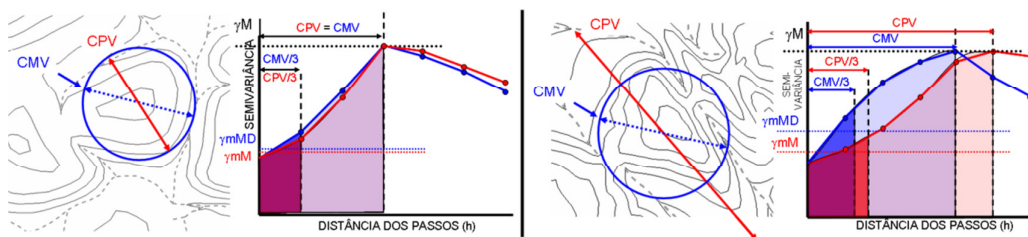


FIGURA 22. Comparação entre dois relevos hipotéticos com IAR diferentes. À esquerda: relevo com IAR muito baixo, onde as médias das semivariâncias multidirecional (γ_{mMD}) e na direção com maiores CPVs (γ_{mM}) é muito próxima no primeiro terço dos semivariogramas. À direita: relevo com elevado IAR, onde a diferença entre as médias das semivariâncias iniciais (γ_{mMD} e γ_{mM}) é mais expressiva.

Na FIGURA 22 são mostrados dois exemplos de relevos com anisotropias direcionais diferentes, acompanhados dos semivariogramas altimétricos respectivos. No primeiro caso, à esquerda, o relevo é praticamente isotrópico, ou seja, não há alinhamento direcional preferencial do relevo, como esperado para maciços graníticos não-fraturados. Em contraste, à direita é mostrado um relevo fortemente anisotrópico, alinhado na direção NW-SE, cuja feição poderia indicar, por exemplo, o controle estrutural do relevo pela presença de um dique ígneo.

10. Trabalhos desenvolvidos

Para o relevo isotrópico (esquerda) praticamente não há diferença entre CMV e CPV, conforme mostrado no alcance do semivariogramas, ambos ocorrendo junto ao terceiro passo do semivariograma. No exemplo anisotrópico (esquerda) há um forte contraste entre CMV e CPV. Neste caso, o comprimento planar médio das vertentes na direção NW-SE é muito maior que a mesma medida para todas as direções (omnidirecional).

A semivariância máxima é constante para qualquer direção e também para todas as direções (BETTÚ; SOARES, no prelo – Anexo 1), porém a função semivariográfica mostra-se como uma curva menos abrupta nas porções iniciais para a direção de maior continuidade. Isto ocorre porque nesta direção os valores da altimetria tendem a ser mais contínuos em função da distância, como na direção NW-SE, mostrada no exemplo à direita da FIGURA 22. Desta forma utiliza-se, para o cálculo do IAR, o artifício de avaliar apenas o primeiro terço do semivariograma direcional que mostre a função mais suavizada, comparando-o com o primeiro terço do semivariograma multidirecional, pois neste intervalo as diferenças nas taxas de aumento da semivariância são mais evidentes, (FIGURA 22, à direita).

Com base na semivariância média do primeiro terço destes semivariogramas, respectivamente γ_{mMV} e γ_{mMD} para as direções de maior continuidade (NW-SE) e para todas as direções (omnidirecional), mostrados na FIGURA 23, o índice de anisotropia de relevo (IAR) é então calculado a partir da relação numérica entre as duas semivariâncias, através da equação:

$$IAR = 1 - (\gamma_{mMV} / \gamma_{mMD}) \quad (15)$$

Onde IAR é o índice de anisotropia do relevo, γ_{mMV} é a semivariância média para o primeiro terço do semivariograma com maior continuidade espacial e γ_{mMD} é a semivariância média para o primeiro terço do semivariograma omnidirecional.

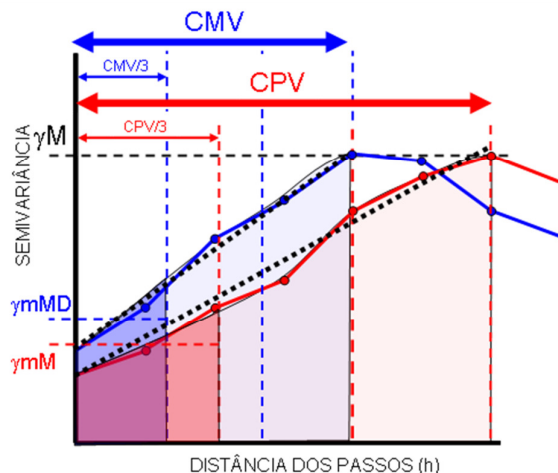


FIGURA 23. Determinação da semivariância omnidirecional (azul - CMV) e na direção com maior CPV (vermelho), respectivamente γ_{mMD} e γ_{mMV} , para o primeiro terço dos semivariogramas.

Quanto mais próximos forem os valores de γ_{mMD} e γ_{mMV} , ou seja, a semivariância para a direção de máxima anisotropia aumenta em taxas próximas ao semivariograma médio, o segundo termo da equação tende a zero, com anisotropia muito baixa ou nula. No outro extremo, sendo γ_{mMV} muito menor que γ_{mMD} , o segundo termo da equação tende a 1, indicando a característica de relevo fortemente anisotrópico.

Neste caso também a identificação da direção em que ocorre a γ_{mMV} , ou seja, a direção de maior alcance, fornece outro atributo geomorfométrico de interesse ao estudo: a direção de anisotropia.

10.2.5. Dimensão fractal do relevo e ajuste da dimensão fractal

A dimensão fractal é uma forma de expressar a dependência/independência das estruturas relativamente às escalas. Uma forma de entender a dimensão fractal é conhecendo a dimensão de Hamel, baseada no número de vetores-base que representam um sistema de geração mínimo para determinados objetos (LANG; BLASCHKE, 2009). Assim, um ponto é 0-dimensional ($D_h = 0$) pois não possui extensão, uma linha reta possui $D_h = 1$, enquanto uma área plana mostra $D_h = 2$, enquanto um corpo tem $D_h = 3$. Entretanto, no meio natural os objetos possuem dimensões fractais (D_f) que não assumem valores integrais, mas valores reais. Por exemplo, tomemos o

10. Trabalhos desenvolvidos

caso de um rio meandrante cuja dimensão fractal fica localizada entre a $D_f = 1$ (reta) e $D_f = 2$ (área), neste caso, quanto maior a sinuosidade do rio, mais ele se afasta da condição retilínea (linha) e se aproxima da condição de área, ou seja, maior sua dimensão fractal, aproximando-se de $D_f = 2$. Em uma situação hipotética extrema, a sinuosidade do rio tornar-se-ia tão grande que ele ocuparia todo o espaço euclidiano da área, alcançando a $D_f = 2$. Em suma, quando uma forma a ser analisada deixa a dimensão geométrica “própria” e se aproxima da próxima, a D_f tende para o próximo valor integral.

Carr (1995) apresenta método para cálculo da dimensão fractal com base na inclinação (β) da curva em semivariogramas experimentais log-log, através da aplicação de uma equação simples:

$$D_f = 2 - \beta/2 \quad (16)$$

Na linha de interpretação de indicadores geomorfométricos a partir da variância altimétrica apresentada por Bettú; Soares (no prelo – Anexo 1) é aplicada uma adaptação do método de Carr (1995), onde os pontos usados na construção dos semivariogramas altimétricos ficam restritos a uma janela pré-definida no entorno de cada cela do mapa, conforme descrito anteriormente.

A dimensão fractal pode variar para um mesmo ponto quando avaliadas diferentes direções, como mostrado no exemplo da FIGURA 24. Através de regressão linear de primeiro grau foram ajustadas retas aos variogramas experimentais log-log para as duas direções mostradas. O ângulo que estas retas realizam com o eixo das abcissas, cujo valor da tangente corresponde ao coeficiente angular das retas ajustadas, fornece a estimativa da dimensão fractal para cada direção.

Para a direção mostrada em azul o coeficiente angular 1,1 (β) é maior que para a direção em vermelho, com coeficiente 0,54 (α), indicando que na primeira a dimensão fractal é menor que na segunda, conforme aplicação da equação apresentada acima, resultando, respectivamente, em valores da dimensão fractal de 1,45 e 1,73.

Também o valor de R^2 , ou seja, o ajuste das funções às retas geradas através das regressões polinomiais serve como atributo morfométrico

10. Trabalhos desenvolvidos

relevante, indicando o quanto o variograma experimental se ajusta à dimensão fractal calculada. Este segundo atributo é denominado ajuste da dimensão fractal (ADF), sendo este também um importante atributo geomorfológico que indica quanto o relevo se ajusta à propriedade fractal, ou quão fractal é o relevo.

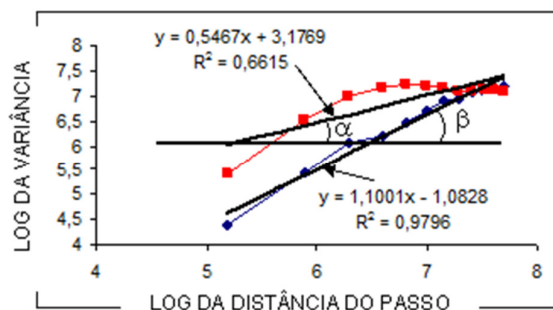


FIGURA 24. Relação entre os variogramas logarítmicos para duas diferentes direções. α e β representam os ângulos que as retas ajustadas por regressão linear fazem com o eixo das abscissas.

As malhas individuais de cada atributo morfométrico avaliado mostram valores contínuos, caracterizados pelo par de coordenadas espaciais de longitude e latitude ("X" e "Y") do nó central da cela e o valor do atributo, correspondente ao eixo "Z" das malhas. As malhas foram convertidas em uma planilha de valores, de modo a integrar todos os atributos morfométricos às coordenadas espaciais, e também possibilitando numerar as celas com base em sua posição no terreno.

A seguir são apresentados os mapas dos atributos descritores do relevo calculados com base em Bettú; Soares (no prelo - anexo 1): rugosidade (FIGURA 25), angulosidade (FIGURA 26), densidade (FIGURA 27), anisotropia (FIGURA 28), direção de anisotropia (FIGURA 29), dimensão fractal (FIGURA 30) e ajuste da dimensão fractal do relevo (FIGURA 31).

10. Trabalhos desenvolvidos

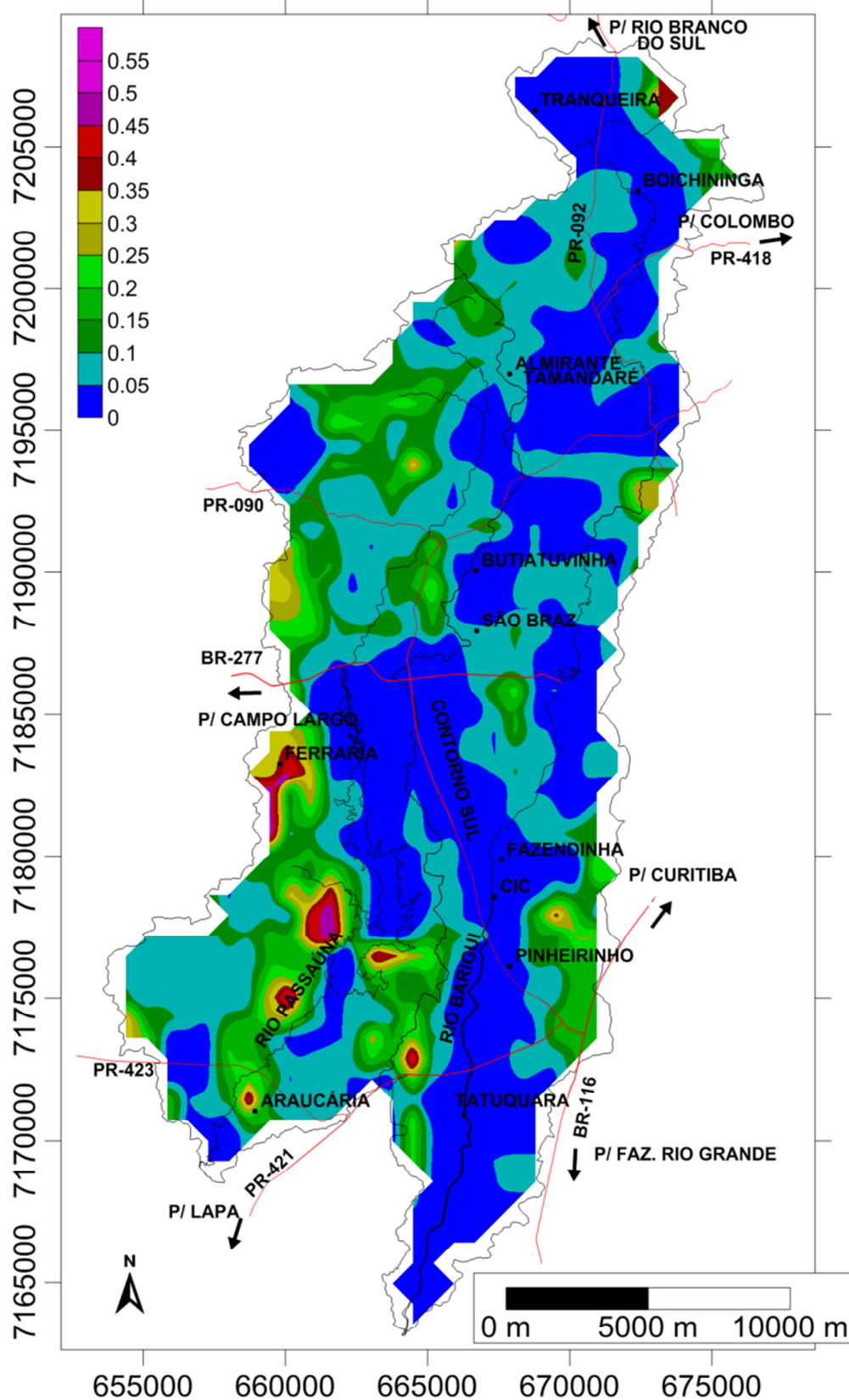


FIGURA 25. Mapa de índice de rugosidade do relevo (IRR) das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.

10. Trabalhos desenvolvidos

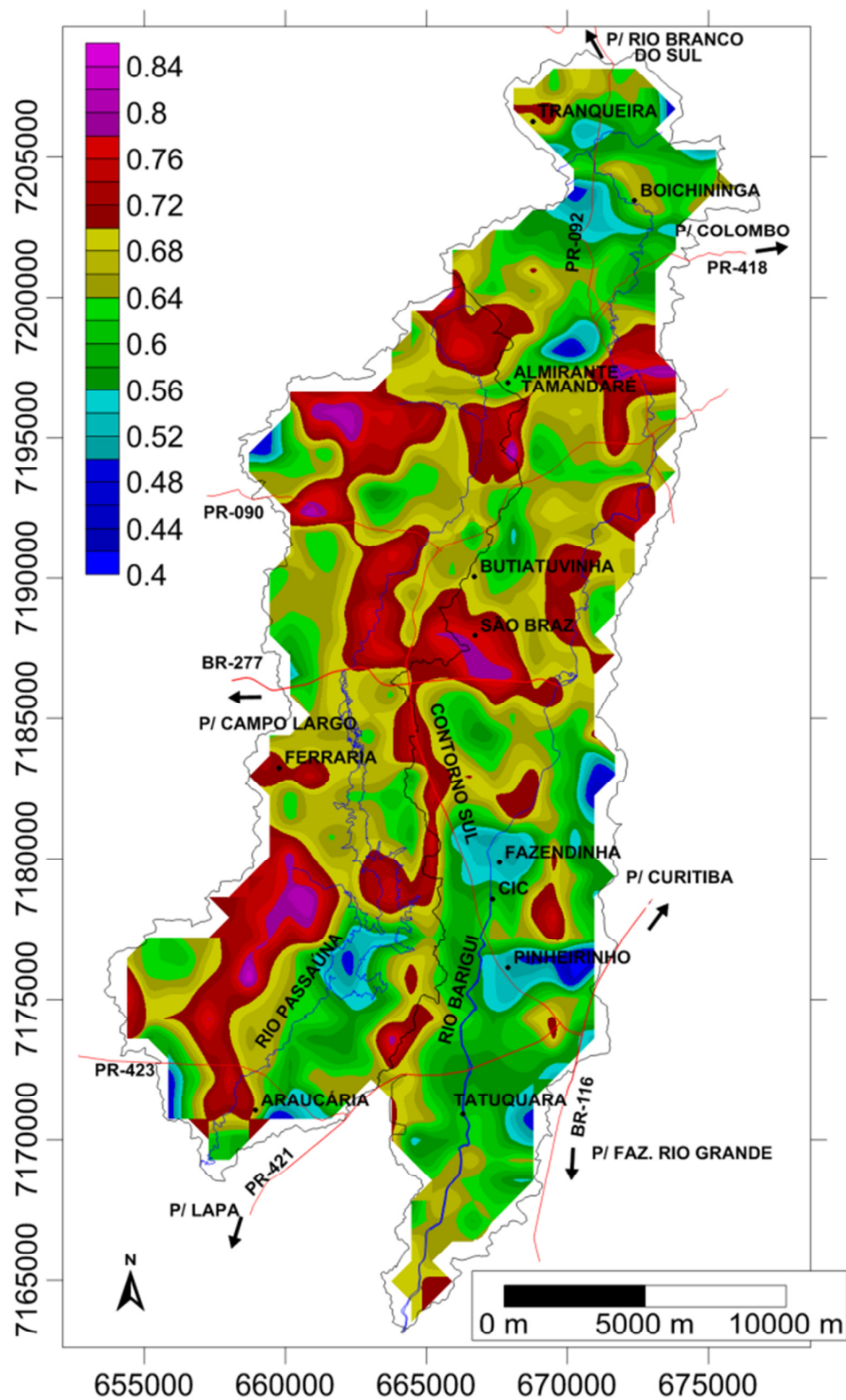


FIGURA 26. Mapa de índice de angulosidade do relevo (IAN) das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.

10. Trabalhos desenvolvidos

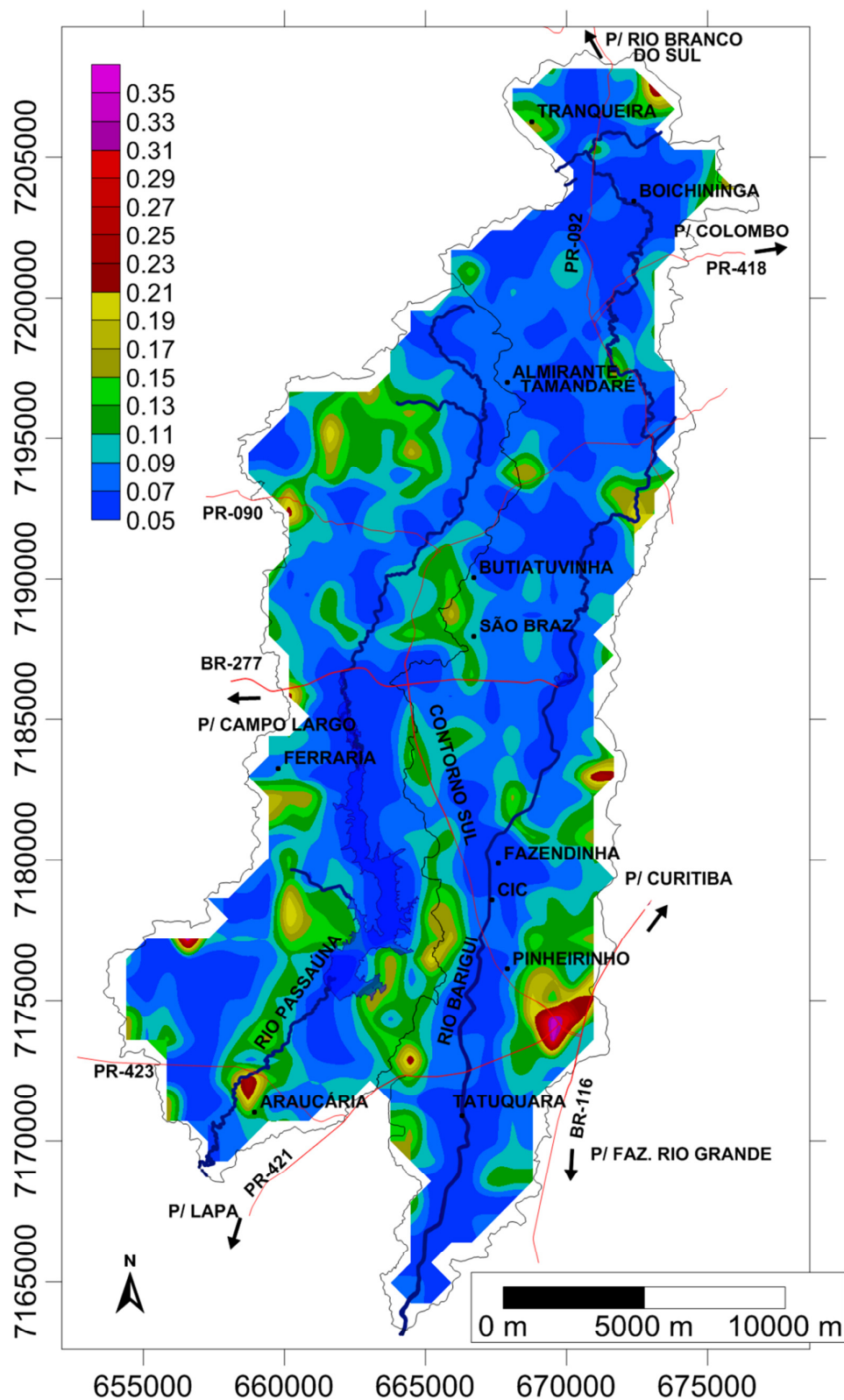


FIGURA 27. Mapa de índice de densidade de relevo (IDR) das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.

10. Trabalhos desenvolvidos

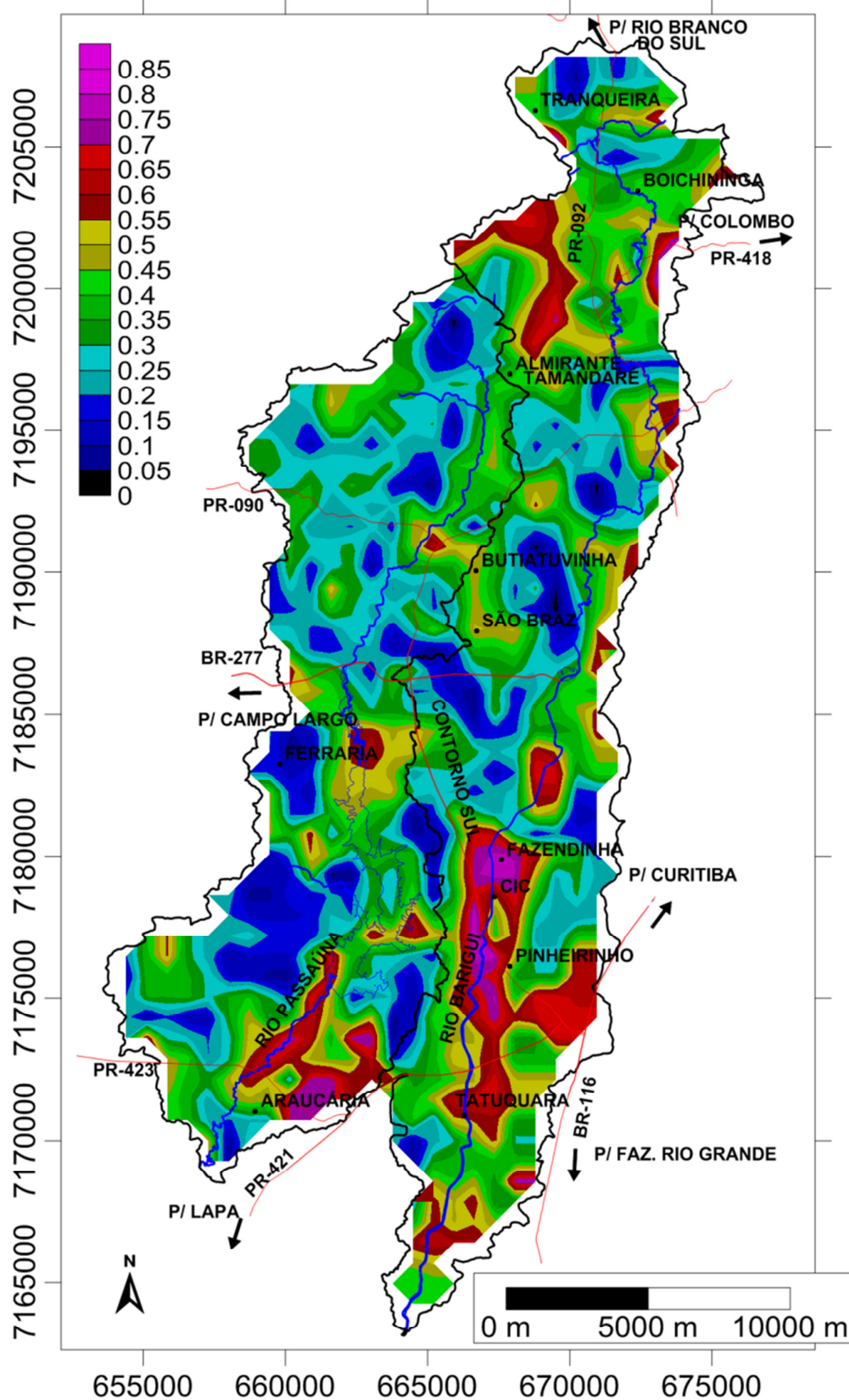


FIGURA 28. Mapa do índice de anisotropia de relevo (IAR) das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.

10. Trabalhos desenvolvidos

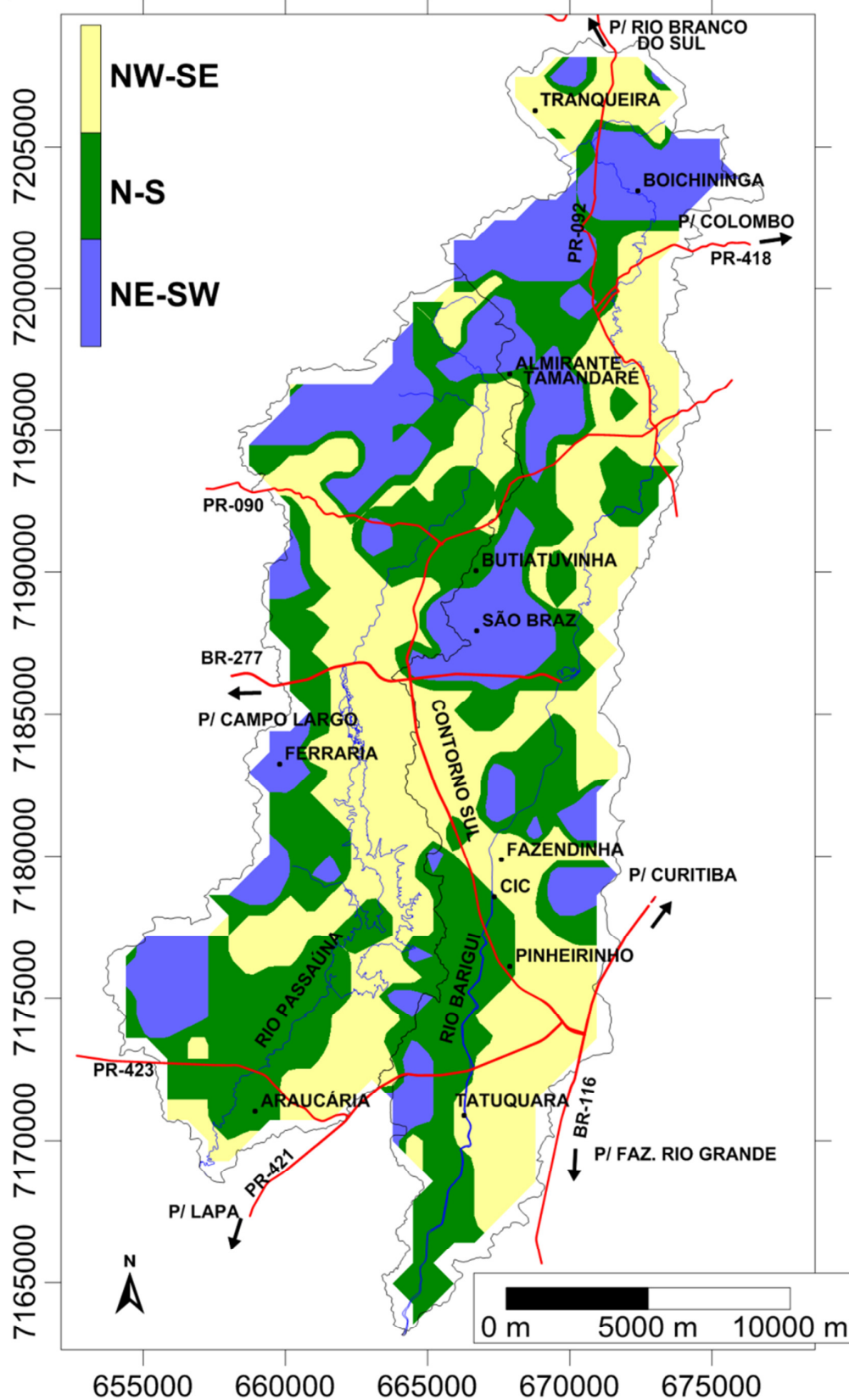


FIGURA 29. Mapa de direção de anisotropia de relevo das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui

10. Trabalhos desenvolvidos

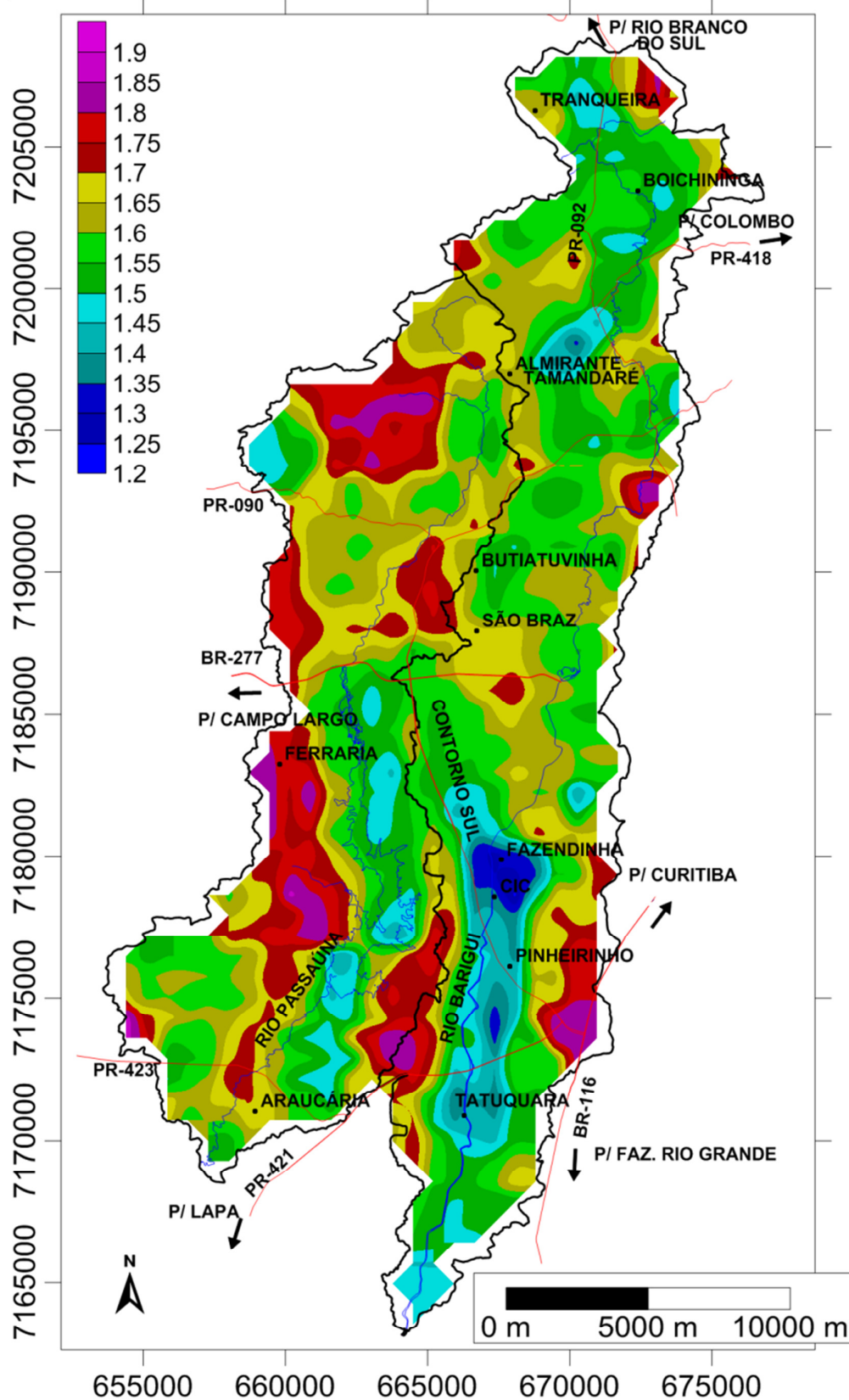


FIGURA 30. Mapa da dimensão fractal do relevo das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui.

10. Trabalhos desenvolvidos

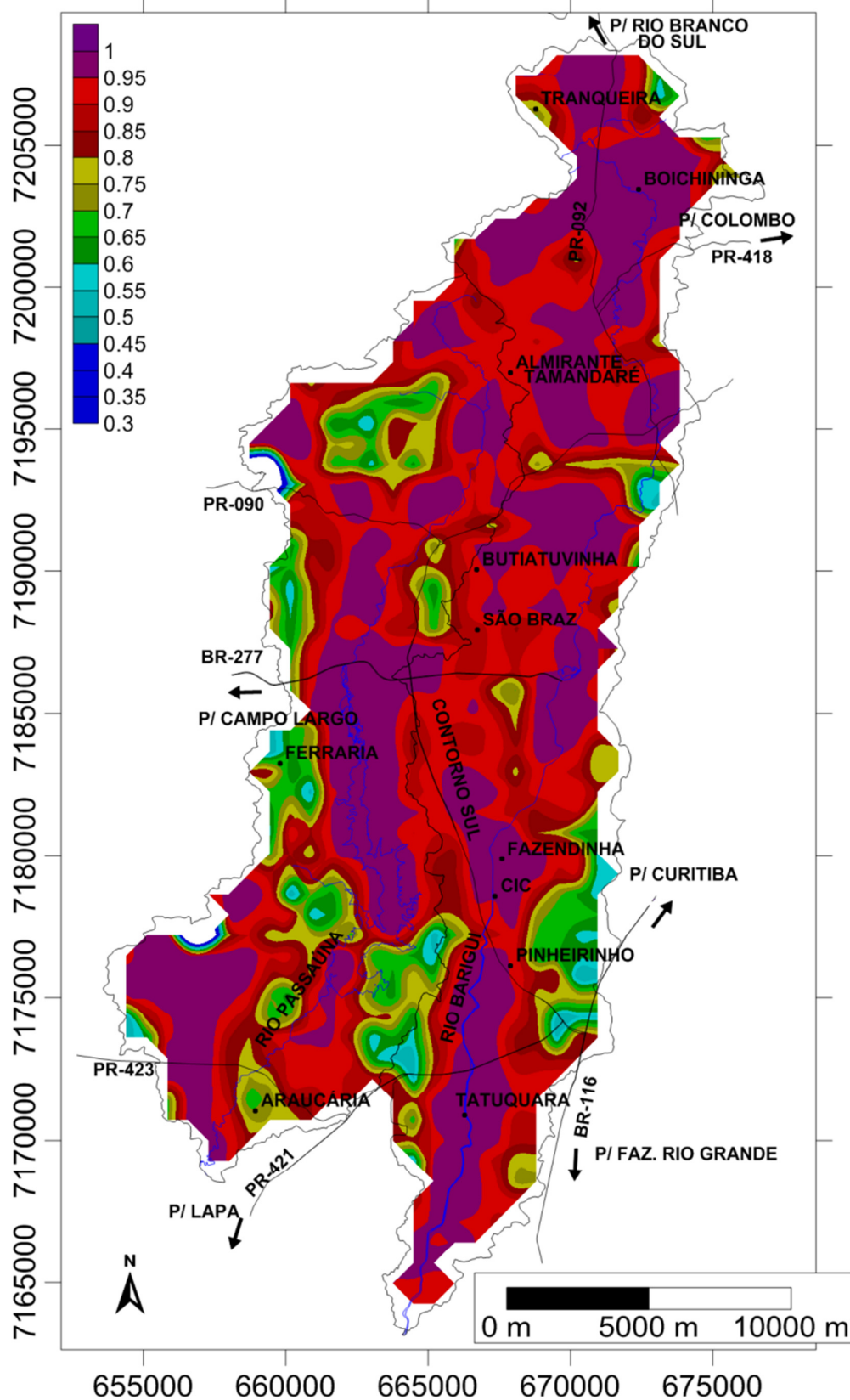


FIGURA 31. Mapa de ajuste da dimensão fractal das bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigüi.

10.3. Seleção dos atributos descritores do relevo

Como base para a construção dos modelos conceituais das UPGs a serem mapeadas, nesta nova proposta metodológica, a seleção dos atributos descritores do relevo efetivamente relevantes quanto à distinção das unidades é de suma importância. Esta medida visa identificar e reduzir a redundância da informação de entrada para o processamento, e tem como base teórica a necessidade de independência entre as variáveis para a aplicação das técnicas de probabilidade condicional. A incorporação de dados redundantes, ou seja, com interdependência, resultaria na criação de um viés espúrio nas probabilidades calculadas (produto das probabilidades individuais de cada variável/atributo). A partir dos atributos identificados como independentes é que serão gerados os modelos probabilísticos de ocorrência de cada UPG.

De modo a identificar a dependência entre os diferentes atributos estimados foi construída uma matriz de correlação, a qual quantificou a interdependência das variáveis, fornecendo assim critério para a exclusão de atributos indesejados no processamento, bem como a manutenção daqueles relevantes ao objetivo do mapeamento.

10.3.1. Análise da independência dos atributos descritores do relevo

Após integração de todos os atributos descritores do relevo em uma planilha, já referenciada à malha final de mapeamento, ou seja, contemplando as 926 celas pré-estabelecidas, a investigação das relações de interdependência foram investigadas por meio da construção de uma matriz de similaridade entre as variáveis (TABELA 1).

Nesta matriz, cada atributo foi avaliado frente aos demais, em termos de seu valor absoluto, cela a cela, através do cálculo do coeficiente de determinação (r^2) e de correlação (r) de Pearson. Como parâmetro de avaliação da correlação adotou-se como variáveis interdependentes aquelas cujo coeficiente de correlação foi superior a 0,4 ou inferior a -0,4, respectivamente destacados nas cores vermelho e cinza na TABELA 1. Entende-se que elevados coeficientes de correlação positivos representam uma dependência positiva, de forma que quando o valor da primeira variável

10. Trabalhos desenvolvidos

(atributo) aumenta, a segunda também aumenta. No outro extremo, coeficientes negativos elevados mostram dependência negativa, de forma que quando o valor da primeira variável aumenta, a segunda diminui.

TABELA 1. Matriz de similaridade entre os atributos (coeficiente de correlação Pearson).

	ALTITUDE	DECLIVIDADE	CURV. PERFIL	CURV. PLANTA	ANISOTROPIA	DIR. ANISOTROPIA	RUGOSIDADE	DIM. FRACTAL	AJ. DIM. FRACTAL	ANGULOSIDADE	DENSIDADE	NWDI	NVDI
ALTITUDE	1,000	0,616	-0,163	-0,124	-0,132	-0,201	0,041	0,216	0,008	0,053	0,033	0,420	0,579
DECLIVIDADE	0,616	1,000	0,030	-0,062	-0,087	-0,155	0,182	0,281	0,029	0,217	-0,037	0,577	0,603
CURV. PERFIL	-0,163	0,030	1,000	0,424	0,052	-0,001	-0,079	-0,100	0,148	-0,004	-0,125	0,150	-0,069
CURV. PLANTA	-0,124	-0,062	0,424	1,000	-0,008	0,017	-0,024	-0,037	0,062	0,015	-0,037	-0,023	0,003
ANISOTROPIA	-0,132	-0,087	0,052	-0,008	1,000	0,062	-0,220	-0,353	0,160	-0,327	-0,124	-0,081	-0,152
DIR. ANISOTROPIA	-0,201	-0,155	-0,001	0,017	0,062	1,000	-0,153	-0,180	0,065	-0,073	-0,013	-0,082	-0,133
RUGOSIDADE	0,041	0,182	-0,079	-0,024	-0,220	-0,153	1,000	0,724	-0,825	0,184	0,511	0,056	0,123
DIM. FRACTAL	0,216	0,281	-0,100	-0,037	-0,353	-0,180	0,724	1,000	-0,725	0,429	0,596	0,143	0,248
AJ. DIM. FRACTAL	0,008	0,029	0,148	0,062	0,160	0,065	-0,825	-0,725	1,000	-0,057	-0,673	0,115	0,028
ANGULOSIDADE	0,053	0,217	-0,004	0,015	-0,327	-0,073	0,184	0,429	-0,057	1,000	0,113	0,129	0,181
DENSIDADE	0,033	-0,037	-0,125	-0,037	-0,124	-0,013	0,511	0,596	-0,673	0,113	1,000	-0,114	-0,013
NWDI	0,420	0,577	0,150	-0,023	-0,081	-0,082	0,056	0,143	0,115	0,129	-0,114	1,000	0,606
NVDI	0,579	0,603	-0,069	0,003	-0,152	-0,133	0,123	0,248	0,028	0,181	-0,013	0,606	1,000

A análise dos valores dos coeficientes de correlação de Pearson, calculadas em relação aos pares de coordenadas revelou que a maioria das correlações é muito baixa, com valores próximos a zero, com maioria menor que +/- 0,2. Acima deste valor ocorre um salto dos coeficientes, que ultrapassam o patamar de 0,4, com valores extremos ultrapassando -0,8. Com base nestas características optou-se por adotar como limite de independência entre pares de variáveis o valor de coeficiente de correlação de Pearson de +/- 0,4. Pares de coordenadas com coeficientes maiores que este limiar foram considerados como potencialmente interdependentes. Desta forma as principais relações de interdependência provável, identificadas entre os atributos descritores do relevo, são mostradas na TABELA 2, incluindo os valores dos coeficientes de correlação calculados.

TABELA 2. Relações de interdependência importantes entre os atributos descritores do relevo.

ATRIBUTO	r
Declividade X altitude	0,616
NDWI x NDVI	0,606
NDWI x declividade	0,603
Densidade x dimensão fractal	0,596
NDWI x altitude	0,579
NDVI x declividade	0,577
Densidade x rugosidade	0,511
Angulosidade x dimensão fractal	0,429
Curv. em planta x curv. em perfil	0,424
NDVI x altitude	0,420
Densidade x ajuste dim. fractal	-0,673
Ajuste dim. fractal x dimensão fractal	-0,725
Ajuste dim. fractal x rugosidade	-0,825

10. Trabalhos desenvolvidos

Com base nestas relações foram excluídos aqueles atributos que se mostraram mais interdependentes com os demais: altitude, curvatura em planta, NDWI, dimensão fractal e ajuste da dimensão fractal. Considerou-se então que o restante dos atributos descritores do relevo, ou seja, aqueles que apresentaram interdependências pequenas entre si, podem ser considerados independentes, permitindo assim que sejam integrados e interpretados para a construção dos modelos conceituais das UPGs e, por conseguinte, dos modelos probabilísticos de ocorrência das unidades.

10.3.2. Discretização dos atributos descritores do relevo

Cada atributo identificado como independente dos demais foi discretizados em três categorias, ou seja, classificado quanto a seus valores absolutos nas classes baixa (B), moderada (M) e alta (A). A única exceção ficou por conta do atributo “direção de anisotropia de relevo”. Por conta do método de cálculo empregado, para este atributo foram geradas, automaticamente, quatro classes direcionais: Norte-Sul, Nordeste-Sudoeste, Leste-Oeste e Noroeste-Sudeste.

Conforme descrito em detalhe na seção “Metodologia proposta”, os limites entre as classes de cada atributo foram determinados por meio da identificação dos limites naturais de frequência dos valores, adicionado de uma margem de tolerância. Esta margem de tolerância foi definida em 10% da variação total de cada classe, ou seja, cada limite natural passou a abranger uma faixa de valores de $\pm 10\%$ para o interior de duas classes contíguas. Este artifício incorporou aos dados uma medida da incerteza de que um dado valor (de um atributo) pertença a uma determinada classe ou à classe subsequente. Pretendeu-se com isso tornar mais flexível a classificação de cada cela frente aos atributos descritores do relevo, fazendo com valores muito próximos ao limite de uma dada classe possam ser interpretados, pelo aplicativo de análise de favorabilidade, como incertos de pertencer a uma ou outra classe.

Os limites naturais entre as classes dos atributos e os limites efetivamente adotados para a continuação do teste metodológico (incluindo a

10. Trabalhos desenvolvidos

incerteza) são mostrados na TABELA 3, com exceção das classes do atributo “direção de anisotropia”, cujas classes são mostradas na QUADRO 3.

TABELA 3. Estatísticas dos atributos descritores do relevo, limites naturais (três classes com igual frequência) e limites usados para incorporação da incerteza da informação.

Atributo	Mínimo Média Máximo Desvio- Padrão	Limites naturais entre as classes		Limites de classes com incerteza		
Declividade (graus)	0 3,9 21 2,7	Baixa/Média 2,9	Média/alta 4,6	Baixa < 3	Média > 2,5 e < 6	Alta > 5,5
Curvatura em perfil	-0,0046 3,35 0,0036 0,00057	Convexo /retilíneo -0,000032	Retilíneo /Côncavo 0,000088	Convexo < - 0,00007	Retilíneo > - 0,00015 e < 0,00015	Côncavo > 0,00007
Anisotropia	0,02 0,35 0,80 0,16	Baixa /média 0,26	Média/alta 0,41	Baixa < 0,16	Média > 0,12 e < 0,63	Alta > 0,57
Rugosidade	0,002 0,079 0,504 0,075	Baixa /média 0,037	Média/alta 0,077	Baixa < 0,024	Média > 0,018 e < 0,2	Alta > 0,12
Angulosidade	0,40 0,65 0,83 0,06	Baixa /média 0,62	Média/alta 0,68	Baixa < 0,6	Média > 0,53 e < 0,76	Alta > 0,7
Densidade de relevo	0,05 0,08 0,34 0,03	Baixa /média 0,07	Média/alta 0,09	Baixa < 0,066	Média > 0,054 e < 0,14	Alta > 0,12
NDVI	-0,11 0,35 0,57 0,11	Baixa /média 0,32	Média/alta 0,41	Baixa < 0,35	Média > 0,31 e < 0,415	Alta > 0,385

QUADRO 3. Limites de classes para o atributo direção da anisotropia. Sem incerteza.

Direção de anisotropia (azimute trigonométrico)	Leste-oeste 0°	Nordeste-sudoeste 45°	Norte-sul 90°	Noroeste-sudeste 135°
---	-------------------	--------------------------	------------------	--------------------------

10.4. Definição das UPGs a serem mapeadas

Definidas as classes dos atributos descritores independentes do relevo, o próximo passo para a continuidade do teste da proposta metodológica foi a definição dos eventos ou objetos, ou seja, as Unidades de Paisagem Geomórficas, a serem mapeadas pela técnica da análise de favorabilidade.

10. Trabalhos desenvolvidos

Admite-se nesta proposição que as UPGs são entidades discretas e limitadas, e não apresentam continuidade com as unidades vizinhas. Portanto a variação espacial contínua nos valores dos atributos é considerada com uma deficiência analítica apenas e não uma propriedade intrínseca do relevo. Nas diferentes celas de uma UPG o conjunto de atributos deve se repetir. O limite entre uma UPG e outra, em princípio, é definido por alguma feição natural, como um rio, uma crista ou uma quebra de relevo, eventualmente não detectada no processamento numérico. Muitas vezes, mesmo visualmente, tais limites não são detectados, tendo sido considerados como devidos a variação progressiva (limites progressivos) ou estabelecidos por envoltórias (limites envoltórios) (SOARES; FIORI, 1976).

Por esta razão, admite-se que dado um conjunto de valores dos atributos em uma cela pode-se estimar a probabilidade de que esta cela pertença a uma determinada UPG e sucessivamente às demais. A UPG que receber uma maior probabilidade de ser, relativamente à probabilidade de não ser, será considerada a unidade apropriada. Para isto torna-se necessária uma definição prévia de UPGs, o que poderia ser feito tanto visualmente no campo, em mapas ou em imagens do relevo.

Visando a definição das UPGs a serem mapeadas neste desenvolvimento metodológico, optou-se por determinar previamente um conjunto consistente de unidades de paisagem geomórficas, tendo como premissa que estas fossem diferenciáveis entre si o suficiente para que pudessem ser determinadas por quaisquer dos métodos atualmente aplicados para este fim. Em uma etapa de campo preliminar foram delimitadas cinco compartimentos geomórficos, onde as feições de relevo mostram-se suficientemente distintas, de modo a justificar separá-las. Posteriormente, sobre o modelo digital de elevação do terreno, as unidades identificadas em campo foram analisadas quanto à morfologia do relevo, através da análise textural expedita da área de entorno dos pontos vistoriados no terreno. Desta forma foram definidos cinco compartimentos geomórficos distintos (UPGs 1 a 5), mostrados na FIGURA 32, os quais ocorrem dispersos em setores das bacias estudadas.

10. Trabalhos desenvolvidos

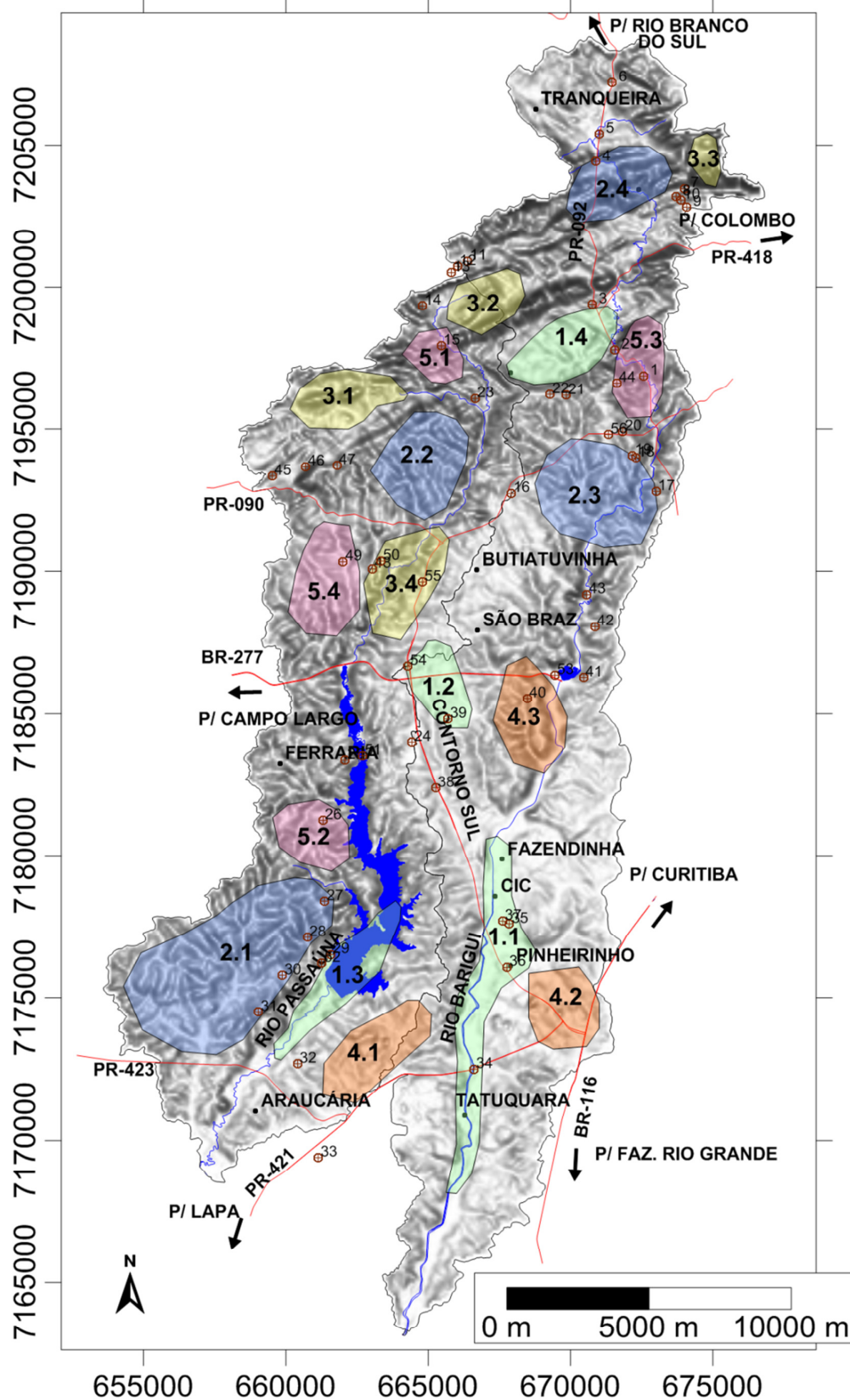


FIGURA 32. Unidades de paisagem geomórfica determinadas a priori com base em informações de campo (pontos) e análise da textura de relevo sobre o MDET.

10. Trabalhos desenvolvidos

A UPG 1 tem como características principais o relevo suave a plano, normalmente em planícies aluvionares atuais. Por vezes estas condições ocorrem associadas à presença de metacalcários da Formação Capiu (Grupo Açungui), que constituem planícies cársticas limitadas por filitos e quartzitos, mais resistentes ao intemperismo e que por isso sustentam o relevo. São zonas com relevo isotrópicos, normalmente de deposição sedimentar ou, em áreas onde há dissecação do relevo, sem entalhamento significativo das drenagens. Neste contexto foram delimitadas quatro zonas principais de ocorrência da UPG 1:

- UPG 1.1 – Localizada na planície do baixo curso do rio Barigui, região da Cidade Industrial de Curitiba. Nesta área o vale do rio Barigui é aberto, compondo uma extensa planície, que se junta com a planície do rio Iguaçu, poucos quilômetros abaixo. O substrato geológico é formado por sedimentos aluvionares (predominante) e migmatitos do Complexo Atuba. Devido à proximidade com a área industrial, a ocupação urbana é bastante adensada neste compartimento, conforme pode ser visto na FIGURA 33.
- UPG 1.2 – Região de interflúvio entre as bacias dos rios Passaúna e Barigui, junto ao contorno rodoviário sul, no bairro São Bráz (Curitiba). Área de topo aplainado, alongado na direção norte-sul. Devido às características de baixa rugosidade e densidade de relevo, além da isotropia de relevo, se assemelham às planícies atuais, do ponto de vista geomórfico. A geologia local é marcada pela presença de sedimentos da Bacia de Curitiba (Formação Guabirota) por migmatitos do embasamento cristalino (Complexo Atuba). A ocupação desta porção da UPG 1 varia entre urbana e suburbana.
- UPG 1.3 - Localizada no baixo curso do rio Passaúna, periferia da cidade de Araucária, apresenta características geomórficas semelhantes à UPG 1.1 (vale aberto), porém com planície menos desenvolvida. Geologicamente é marcada pela presença de sedimentos aluvionares recentes, margeados por migmatitos e

10. Trabalhos desenvolvidos

gnaisse do embasamento cristalino. O padrão de ocupação predominante é rural, com destaque para a presença da represa do Passaúna no interior desta área.

- UPG 1.4 – Área de planície cárstica entre a sede da cidade de Almirante Tamandaré e a localidade de São Miguel, na bacia do rio Barigui, em seu alto curso. Afloram nesta porção metacalcários da Formação Capiuru, intercaladas por diques de diabásio mesozoicos. Na sede do município a ocupação urbana é consolidada (FIGURA 34), enquanto na região de São Miguel, predomina o uso rural do solo (FIGURA 35).



FIGURA 33. Característica da UPG 1 (1.1) próximo à foz do rio Barigui, Cidade Industrial de Curitiba. Ponto de campo 34.

10. Trabalhos desenvolvidos



FIGURA 34. Ocupação urbana consolidada na UPG 1 (1.4), região da sede municipal de Almirante Tamandaré.



FIGURA 35. Vista panorâmica da região de São Miguel (interior de Almirante Tamandaré), mostrando a planície cárstica na porção rebaixada do relevo (UPG 1.4), com o relevo ao fundo sustentado por cristas de quartzito.

10. Trabalhos desenvolvidos

Na UPG 2 predomina o relevo brando, porém com talvegues entalhados e vertentes curtas, que em conjunto resultam em incremento na densidade e na rugosidade do relevo, destacando a textura de relevo característica da unidade. O entalhamento dos talvegues, controlados essencialmente pela estruturação geológica, condiciona a anisotropia do relevo, com setores mostrando tendências variadas de orientação de cristas e vales. Preliminarmente foram identificados quatro setores das bacias onde estas características são recorrentes, permitindo delimitar as áreas de ocorrência-tipo:

- UPG 2.1 – Localizada na margem direita do rio Passaúna, em seu baixo curso, a oeste da represa homônima (município de Araucária). Trata-se de uma ampla área onde as condições geomórficas acima descritas são recorrentes, indicando importantes processos de dissecação das vertentes. Geologicamente está assentada sobre gnaisses e migmatitos do embasamento cristalino (Complexo Atuba). Localmente, em afluentes do rio Passaúna, são encontrados depósitos aluvionares de pequena expressão (FIGURA 36, FIGURA 37 e FIGURA 38). O uso do solo nesta região é dominado por áreas agrícolas intercaladas com remanescentes florestais;
- UPG 2.2 – Localizada também na margem direita do rio Passaúna, porém na região das cabeceiras do rio, a norte da PR-090, no município de Curitiba, sentido a Campo Magro. Repetem-se as condições de entalhamento das drenagens, com característica densidade e anisotropia de relevo. Entretanto a área encontra-se disposta sobre filitos do Grupo Açungui, indicando uma relação entre a densidade de relevo e a baixa permeabilidade destas rochas. A ocupação característica desta região é florestal, com fragmentos de áreas agrícolas, eventualmente com padrão suburbano;
- UPG 2.3 – Presente na bacia do rio Barigui, ocupando as duas margens do rio, em seu curso médio, entre os bairros Butiatuvinha e Santa Felicidade, município de Curitiba. São áreas de afloramento de migmatitos do embasamento cristalino,

10. Trabalhos desenvolvidos

localmente superpostos por sedimentos aluvionares recentes, no curso do rio Barigui. Localmente, nos interflúvios mais elevados, ocorrem remanescentes das paleosuperfícies latossólicas e/ou húmicas (respectivamente PS1 e PS2 de RIFFEL, 2006 / PD1 e PD2 de AB'SABER; BIGARELA, 1961 - FIGURA 39). Predomina neste setor o uso do solo urbano a suburbano;

- UPG 2.4 – No extremo norte da bacia do rio Barigui, área de cabeceiras de drenagem, englobando a localidade de Boichininga (município de Almirante Tamandaré), até a rodovia PR-092. Nesta região ocorrem filitos e metacalcários do Grupo Açungui, em camadas intercaladas, orientadas na direção NE-SW. Em porções rebaixadas dos metacalcários podem ser encontrados depósitos aluvionares em planícies alveolares. O uso do solo é alternado entre remanescentes florestais e áreas agrícolas.



FIGURA 36. Relação entre as vertentes esculpidas (ao fundo) com as pequenas planícies aluvionares no interior da UPG 2.1. Ponto de verificação de campo 28.

10. Trabalhos desenvolvidos



FIGURA 37. Vista panorâmica da UPG 2.1, mostrando os dois padrões de uso do solo mais comuns, áreas agrícolas e remanescentes florestais. Ponto de verificação de campo 27.



FIGURA 38. Exemplo da rugosidade do relevo característica da UPG 2 (UPG 2.1). ponto de verificação de campo 29.

10. Trabalhos desenvolvidos

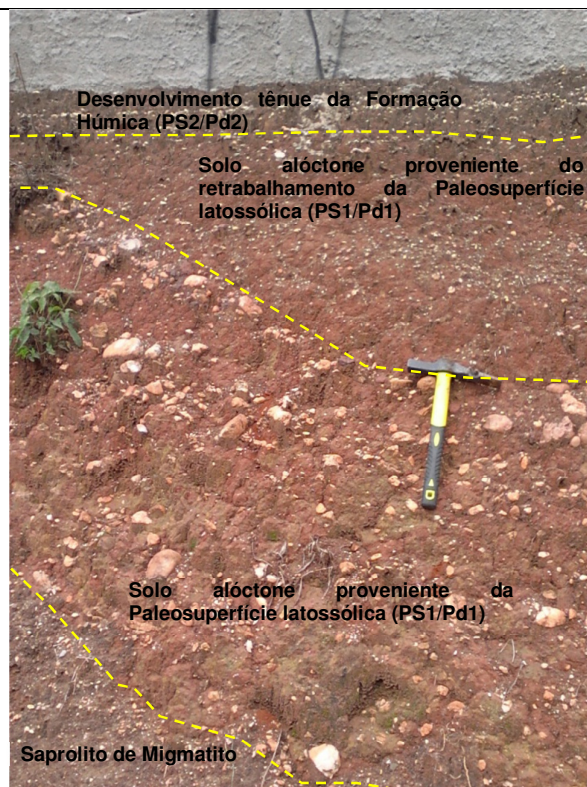


FIGURA 39. Remanescente das paleosuperfícies PS1/Pd1 (latossólica) e PS2/Pd2 (húmica) em alto estrutural, conforme Riffel (2006) e Ab'Saber e Bigarella (1961). Próximo ao ponto de verificação de campo 19 – UPG 2.3.

O terceiro compartimento geomorfológico evidenciado em campo e a partir das características texturais do MDET, UPG 3, predomina na região norte das bacias. Nestas áreas a declividade do relevo é moderada, com cristas e vales mostrando forte condicionamento estrutural, o que implica em evidente anisotropia direcional do relevo. Neste contexto a densidade e a rugosidade de relevo mostram-se destacadas na textura do relevo do MDET. Devido ao relevo íngreme, é comum a presença de depósitos coluvionares nas porções mais baixas das vertentes. Esta condição é evidenciada também pela presença de cicatrizes de escorregamentos recentes, especialmente nos filitos que margeiam as cristas de quartzitos. Foram definidas quatro áreas-tipo desta unidade, conforme segue:

- UPG 3.1 – Localizada no norte da bacia do Passaúna, área de nascentes que formam este sistema hidrológico, entre as sedes municipais de Campo Magro e Almirante Tamandaré. Neste setor, geologicamente, ocorrem intercalações de filitos, quartzitos e metacalcários do Grupo Açungui, com os primeiros sustentando o

10. Trabalhos desenvolvidos

relevo e estes últimos situados nas porções rebaixadas do relevo, devido ao intemperismo diferencial. Devido ao relevo acentuado, a ocupação do solo principal é de floresta, intercalada ao uso agrícola;

- UPG 3.2 – Situada nas áreas de cabeceira da bacia do rio Passaúna, ocupando o interflúvio desta com a bacia do rio Barigui, a leste da sede municipal de Almirante Tamandaré, na região da estrada do Marmeleiro. A geologia local é idêntica à UPG 3.1, ou seja, ocorrem intercalações de metassedimentos do Grupo Açungui, com os quartzitos sustentando o relevo mais acentuado (FIGURA 40) e metacalcários nas porções arrasadas. Remanescentes florestais e propriedades rurais predominam neste setor;
- UPG 3.3 – Situada próximo à localidade de Boichininga, município de Almirante Tamandaré, sentido ao município de Colombo, no alto vale do rio Barigui. Geologicamente este setor apresenta camadas de filitos intercalados com quartzitos do Grupo Açungui, orientados na direção NE-SW, com estes sustentando o relevo acentuado (FIGURA 41 e FIGURA 42). Devido às características de relevo, o uso do solo mais comum é o florestal, com fragmentos rurais em menor proporção.
- UPG 3.4 – Localizado no médio vale do rio Passaúna, no bairro Butiatuvinha (município de Curitiba). Nesta região afloram migmatitos do embasamento cristalino (Complexo Atuba), localmente superpostos por sedimentos aluvionares recentes. O uso do solo na região é alternado entre rural, urbano a suburbano, com remanescentes florestais nas áreas mais acidentadas e junto aos cursos d'água.

10. Trabalhos desenvolvidos



FIGURA 40. Crista de quartzito orientada na direção NE-SW, sustentado o relevo acentuado na UPG 3.2. A norte do ponto de verificação de campo 09.



FIGURA 41. Relevo ondulado com crista de quartzito (NE-SW) sustentando o relevo na UPG 3.3. Ponto de verificação de campo 11.

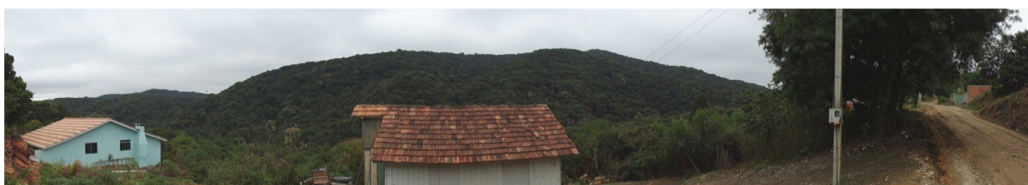


FIGURA 42. Cristas e vales orientados na direção NE-SW, nas proximidades do ponto de verificação do afloramento 10, UPG 3.3.

10. Trabalhos desenvolvidos



FIGURA 43. Depósito coluvionar em rampa, comum nas vertentes inclinadas da UPG 3. Ponto de verificação de campo 10.

A quarta unidade geomórfica diferenciada, de modo preliminar, foi evidenciada especialmente na bacia do rio Barigui, exceto por uma ocorrência no interflúvio que limita esta com a bacia do rio Passaúna. Trata-se um relevo com textura mais suave, formado por colinas, sem entalhamento significativo dos talwegues, porém mais dissecadas que a UPG 1. A textura do MDET mostra rugosidade moderada do relevo, com significativo adensamento das feições de relevo, porém menos adensado que o relevo da UPG 2. Foram identificadas três áreas de ocorrência-tipo da UPG 4:

- UPG 4.1 – Localiza-se no interflúvio entre as duas bacias estudadas, no extremo sul da área, no município de Araucária. Geologicamente é condicionada pela presença de sedimentos da Bacia de Curitiba (Formação Guabirotuba), margeados por migmatitos do embasamento (Complexo Atuba), com ocorrências locais de depósitos aluvionares recentes. O uso do solo local é

10. Trabalhos desenvolvidos

predominantemente industrial, com pequenas propriedade rurais margeando as indústrias, onde estão preservados ainda remanescentes florestais.

- UPG 4.2 – Situada na margem esquerda do rio Barigui, na região do interflúvio com a bacia do rio Belém (a leste), próximo à confluência entre as rodovias BR-116 e o contorno rodoviário sul de Curitiba, no bairro do Pinheirinho, nesta cidade. Nesta região afloram migmatitos do Complexo Atuba superpostos localmente por sedimentos aluvionares recentes, junto a alguns rios que compõem a bacia do rio Barigui. Nas porções de topo das vertentes são encontrados remanescentes da Formação Guabirotuba (Bacia de Curitiba). Nesta região o uso do solo é basicamente industrial;
- UPG 4.3 – Está posicionada no médio curso do rio Barigui, na região dos bairros Mossunguê ao Bigorriho, município de Curitiba. A geologia local é dividida entre o embasamento cristalino (migmatitos) e sedimentos aluvionares recentes. Nas porções de topo das colinas ocorrem remanescentes tanto da Formação Guabirotuba, como também, eventualmente, da paleosuperfície latossólicas (PS1/Pd1, RIFFEL, 2006 e AB'SABER; BIGARELLA, 1961). Nesta região a ocupação do solo é urbana, residencial e comercial, localmente em adensamento (FIGURA 44) com expansão imobiliária evidenciada pelo número de prédios em construção, ou com ocupação já consolidada, de baixa densidade, como visto nos arredores do parque Barigui (FIGURA 45).

10. Trabalhos desenvolvidos



FIGURA 44. Ocupação urbana em fase adensamento na UPG 4.3. Ponto de verificação de campo 40.



FIGURA 45. Vale do rio Barigui, nas proximidades do parque homônimo, interior da UPG 4.3. Ocupação urbana residencial de baixa densidade, consolidada. Próximo ao ponto de verificação de campo 40.

10. Trabalhos desenvolvidos

A última unidade geomórfica identificada de forma preliminar em campo e no MDET, a UPG 5, é caracterizada por relevo muito rugoso, de alta densidade espacial, e mostrando evidências de processos de dissecação acentuados. É evidenciado nas porções de meia-encosta das vertentes, onde a elevada densidade do relevo é marcada pela presença de inúmeros interflúvios de ordens menores. Quatro áreas-tipo da UPG 5 foram selecionadas, localizadas especialmente na margem direita do rio Passaúna, exceto por uma ocorrência na margem esquerda do rio Barigui.

- UPG 5.1 – Localizada na região da estrada do Marmeleiro, a oeste da sede municipal de Almirante Tamandaré, no extremo norte da bacia do rio Passaúna. Geologicamente esta unidade está assentada sobre camadas intercaladas de filitos e metacalcários do Grupo Açungui, orientadas na direção NE-SW. A ocupação do solo nesta região é rural, com remanescentes florestais importantes, em estágios diversos de regeneração (FIGURA 46), especialmente nas áreas com relevo mais acidentado;
- UPG 5.2 – Situado a sul da localidade de Ferraria, município de Campo Largo, na porção centro-sul da bacia do rio Passaúna, em sua margem direita. Geologicamente a UPG 5.2 é marcada pela ocorrência de migmatitos do embasamento cristalino (Complexo Atuba), localmente superpostos por sedimentos aluvionares recentes juntos aos rios que compõem a rede de drenagem local. Nas proximidades da localidade de Ferraria predomina o uso do solo urbano a suburbano, passando a rural com remanescentes florestais importantes, mais a sul (FIGURA 47);
- UPG 5.3 – Está localizada na margem direita do rio Barigui, entre as sedes dos municípios de Almirante Tamandaré e Colombo. Afloram na região rochas diversificadas, com migmatitos do embasamento cristalino, filitos e metacalcários do Grupo Açungui, além de diques de diabásio alinhados na direção NW-SE e remanescentes da Bacia de Curitiba. O uso do solo local varia entre residencial urbano a suburbano de baixa densidade

10. Trabalhos desenvolvidos

(FIGURA 48), com pequenas propriedades rurais onde ocorrem importantes remanescentes florestais.



FIGURA 46. Vale em dissecção, com remanescentes florestais em estágios diversos de regeneração na UPG 5.1. Ponto de verificação de campo 15.



FIGURA 47. Vale em dissecção acentuada na UPG 5.2. Uso do solo agrícola e de remanescentes florestais. Ponto de verificação de campo 26.

10. Trabalhos desenvolvidos



FIGURA 48. Área urbana residencial com baixa densidade de ocupação, interior da UPG 5.3. Ponto de verificação de campo 44.

10.5. Composição dos modelos conceituais das UPGs

Definido o nível de detalhamento de interesse para o mapeamento probabilístico, ou seja, a quantidade de UPGs a serem mapeadas, o próximo passo do desenvolvimento metodológico envolveu a construção dos modelos conceituais das unidades identificadas preliminarmente em campo e sobre o modelo digital de elevação do terreno. Tais modelos resumem as características predominantes e são derivados da análise e interpretação de amostras representativas de cada unidade, através de seus atributos descritores do relevo.

A amostragem das UPGs para mapeamento poderia ser realizada por diversos métodos, por exemplo, a partir de mapas pré-existentes ou em campo, a partir da aquisição de referencial geográfico de pontos característicos das unidades. Optou-se, para fins de desenvolvimento metodológico, realizar a seleção de amostras das UPGs a partir de uma classificação estatística dos diferentes grupos de atributos descritores do relevo, discretizados em classes, mantendo assim o caráter automatizado da proposta ora apresentada.

Procedeu-se uma análise de agrupamento pelo método de k-médias, onde as 926 celas da malha final do mapeamento foram separadas em cinco grupos (UPGs), a partir da associação das classes dos atributos descritores do relevo presentes. Este método tem como base a distinção das amostras (celas) em grupos através do cálculo da variância das variáveis (indicadores). Os atributos, portanto, são analisados em sucessivas interações matemáticas até

10. Trabalhos desenvolvidos

que sejam atendidas as condições de: (a) minimização da variância nas amostras intragrupos, e (b) maximização da variância intergrupos. Nos dois casos a variância é calculada através da distância euclidiana, respectivamente entre as amostras individuais e entre os centróides dos agrupamentos. Trata-se de um processo dirigido pelos atributos (*data-driven*), que permite agrupar os dados segundo características comuns, desenvolvendo taxonomias capazes de classificá-los em diferentes grupos. O método de agrupamento por k-médias (não hierárquico) é realizado por repartição dos dados a partir de uma hipótese fornecida *a priori* para o algoritmo, indicando a quantidade de classes presentes no universo amostral, neste caso 5 grupos (ou UPGs). A partir dessa estimativa o algoritmo realiza agrupamentos aleatórios, movendo os dados entre estes conjuntos de forma a minimizar a variabilidade interna a cada conjunto e maximizar a variabilidade entre os conjuntos.

O resultado do agrupamento das celas pelo método k-médias (FIGURA 49) mostra em qual grupo cada cela da malha avaliada foi incluída, a partir da associação estatística entre as diferentes classes dos atributos descritores do relevo. Desta forma foram determinadas as celas de ocorrência dos cinco grupos solicitados, ou seja, das cinco unidades de paisagem geomórficas (UPG) presentes nessa escala de avaliação.

A composição do modelo conceitual de uma unidade foi realizada individualmente para cada UPG. Neste processo, para cada UPG, foram selecionadas um total de vinte celas amostrais, sendo dez representativas de sua ocorrência e as demais representativas de sua não-ocorrência, ou seja, representam a ocorrência de outra unidade qualquer.

Por meio da análise e interpretação das classes de atributos descritores do relevo, associadas às celas amostrais, foram caracterizadas cada uma das cinco UPGs identificadas na área de pesquisa. Estas informações foram utilizadas para a construção de modelos conceituais das unidades, a serem utilizados posteriormente para alimentar o algoritmo de análise de favorabilidade. A construção dos modelos conceituais das UPGs foi realizada a partir da identificação de quais atributos descritores do relevo ocorrem recorrentemente dentro de cada UPG (nas celas amostrais pertencentes a esta unidade), mas também identificando os indicadores que não fazem parte da unidade (celas de outras unidades).

10. Trabalhos desenvolvidos

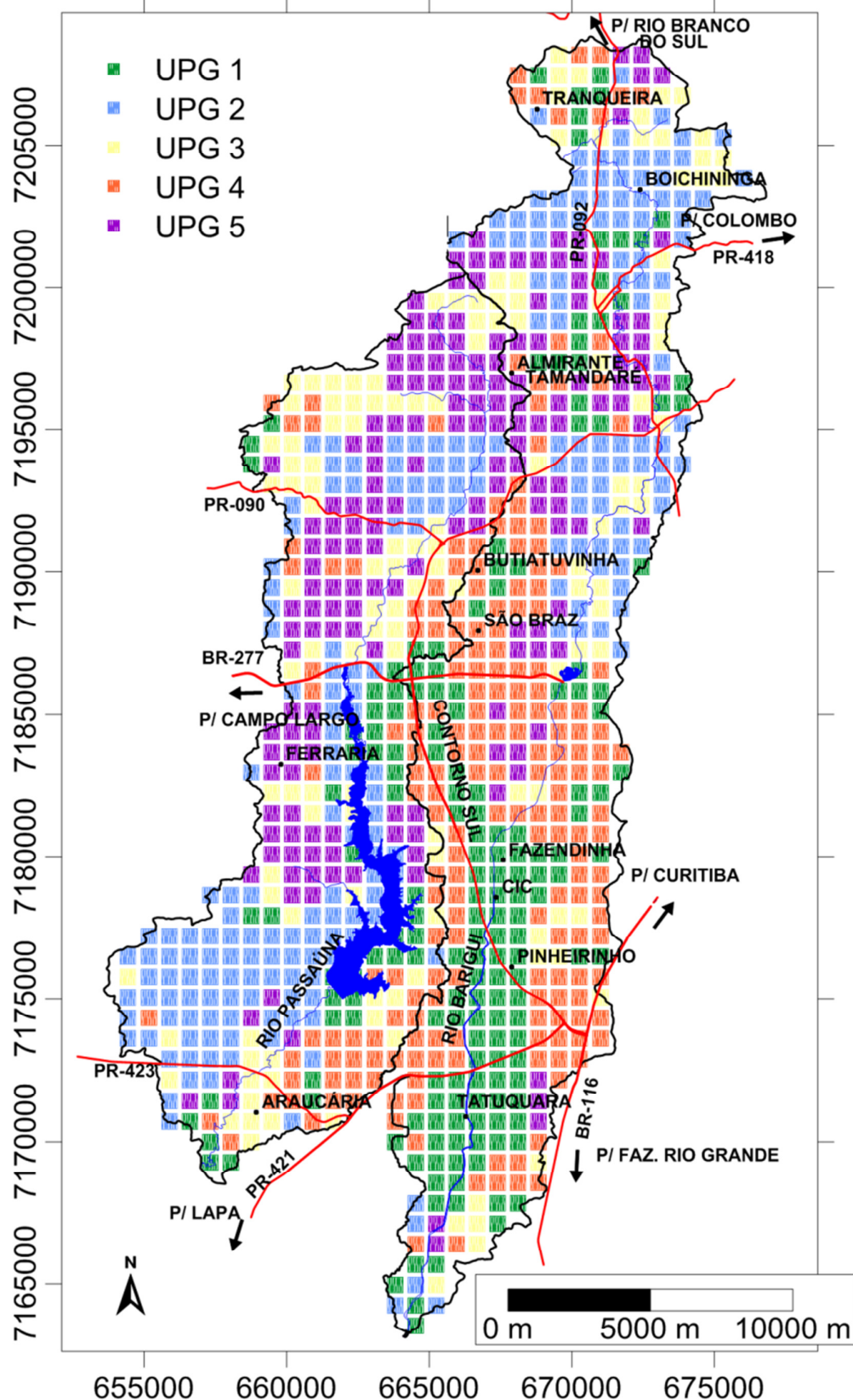


FIGURA 49. Mapa de UPGs para as bacias hidrográficas dos rios Passaúna e Barigui elaborado através de classificação de agrupamento por k-médias das classes de atributos descritores do relevo.

10.5.1. UPG 1 – Domínio de vertentes suaves (DVS)

O Domínio de vertentes suaves (DVS – UPG 1), mostrado em verde no mapa de UPGs por agrupamento (FIGURA 49), ocorre desde a região central da área de pesquisa, até o extremo sul, com pequenos remanescentes a norte. Está associado com as áreas de ocorrência do embasamento geológico da região (gnaisses e migmatitos do Complexo Atuba). É caracterizado por baixas declividades, tanto nos fundos de vale abertos (especialmente no rio Barigui), mas também nas bases das vertentes e em interflúvios suaves, como o que separa as bacias do Barigui e Passaúna. Predominam as vertentes com perfil retilíneo, embora sejam encontrados setores com alternância de formas convexo-retilíneo-côncavas, estas últimas mais comuns na bacia do rio Passaúna. Mostra forte anisotropia de relevo, com orientação das feições (interflúvios e vales) preferencialmente nas direções NW-SE e N-S. A densidade de relevo e a rugosidade são baixas, enquanto a angulosidade é moderada. O índice de vegetação (NDVI) mostra-se preferencialmente baixo, indicando antropização relevante nessa unidade.

No QUADRO 4 são exibidas as características das celas amostrais, ou seja, os atributos descritores do relevo, que caracterizam o domínio de vertentes suaves.

Com base nas informações obtidas nas celas amostrais, o DTC caracteriza-se pela associação de declividades baixas a moderadas; encostas com perfil retilíneo a retilíneo/côncavo; anisotropia de relevo moderada a alta, nas direções NW-SE, N-S e NE-SW; rugosidade baixa; angulosidade baixa a moderada; densidade de relevo baixa a moderada e índice de vegetação (NDVI) baixo a moderado/alto.

10. Trabalhos desenvolvidos

QUADRO 4. Lista de celas amostrais do DVS, exibindo as classes de atributos descritores do relevo.

Cela amostral	Declividade	Curvatura em perfil	Anisotropia do relevo	Direção de anisotropia	Rugosidade do relevo	Angulosidade do relevo	Densidade de relevo	ND VI
65	B/M	RET	M	N	B	M	B/M	B
81	M	RET /CONC	M	N	B	B/M	B	M
216	B	RET	M	NE-SW	B	M	B	B
258	M	CONC	M	N-S	B	M	B/M	B
263	B	RET	M	N-S	B	B/M	M	B
321	B	RET	M/A	N-S	B	B	B	B
370	B/M	RET /CONC	M	NE-SW	B	B	B/M	B
486	B/M	RET	A	E-W	B	B	B/M	B
788	M	RET	M	N-S	B	B	B	M/A
908	M	RET	M	NW-SE	B	B	B/M	A

10.5.2. UPG 2 – Domínio de vertentes esculpidas (DVE)

No mapa de UPGs gerado por agrupamento das classes de atributos (FIGURA 49), o domínio de vertentes esculpidas (DVE – UPG 2) ocupa três zonas principais: a sudoeste, na região central e a norte da área de pesquisa, na forma de agrupamento homogêneos de cela. É encontrada em praticamente toda a bacia hidrográfica do rio Passaúna, mas apenas na área de alto curso do rio Barigui, e caracterizada por vertentes em dissecação, com cristas alinhadas em direções diversas e declividades moderadas. A geologia que suporta a unidade é marcada por gnaisses e migmatitos do Complexo Atuba, além de filitos do Grupo Açungui, a norte.

Os atributos descritores do relevo do DVE referentes às celas amostrais selecionadas são apresentados no QUADRO 5.

10. Trabalhos desenvolvidos

QUADRO 5. Lista de celas amostrais do DVE, exibindo as classes de atributos descritores do relevo.

Cela amostral	Declividade	Curvatura em perfil	Anisotropia do relevo	Direção de anisotropia	Rugosidade do relevo	Angulosidade do relevo	Densidade de relevo	NDVI
107	M	RET /CONC	M/A	N-S	M	A	B/M	A
177	M/A	CONC	M	E-W	M	A	B/M	M
230	A	RET	M	E-W	M/A	A	M	M
332	M	CONC	A	NW-SE	M	A	B/M	B
467	M	CONC	A	N-S	M	A	B	M/A
601	M	CONC	M	N-S	M	A	B	M/A
670	M	RET /CONV	A	E-W	M	A	M	A
677	M	RET	A	E-W	B/M	A	M	A
866	A	RET /CONV	M	NE-SW	M	A	M	A
883	A	RET	M/A	NE-SW	M	A	B	A

De acordo com as características das celas amostrais, o DVE tem como associação de atributos característicos de relevo as declividades moderadas a altas; predomínio de encostas com perfil retilíneo e côncavo; anisotropia de relevo moderada a alta em direções variadas; predomínio de rugosidade de relevo moderada; angulosidade de relevo alta; densidade de relevo baixa a moderada e índice de vegetação (NDVI) moderado a alto.

10.5.3. UPG 3 – Domínio das cristas e vales orientados (DCVO)

Na FIGURA 49 as celas classificadas estatisticamente (agrupamento por k-médias) como pertencentes ao domínio das cristas e vales orientados (DCVO – UPG 3) são exibidas na cor amarela. São representados por pequenos agrupamentos de celas com baixa representatividade no contexto da área total estudada. Estes agrupamentos ocorrem de forma dispersa, tanto no baixo curso das bacias, em porções de vales abertos e em rampas colúvio-aluvionares, como nas porções de nascentes dos rios, onde os agrupamentos

10. Trabalhos desenvolvidos

são mais desenvolvidos. O DCVO está associado a áreas de afloramento de migmatitos do Complexo Atuba, nas porções central e sul das bacias, enquanto a norte dispõe-se sobre sequências alternadas de quartzitos, metapelitos e metacalcários do Grupo Açungui. Geomorficamente, o DCVO é marcado por declividades moderadas a altas, em encostas bastante evoluídas, com setores convexo-retilíneo-côncavo, anisotropia moderada a alta com várias direções de orientação, densidade de relevo baixa a moderada, rugosidade moderada a alta, angulosidade de relevo alta e índice de vegetação (NDVI) baixo a moderado.

O QUADRO 6 apresenta as celas amostrais adotadas para caracterização do DCVO em relação às classes de atributos descritores do relevo.

QUADRO 6. Lista de celas amostrais do DCVO, exibindo as classes de atributos descritores do relevo.

Cela amostral	Declividade	Curvatura em perfil	Anisotropia do relevo	Direção de anisotropia	Rugosidade do relevo	Angulosidade do relevo	Densidade de relevo	NDVI
55	M	RET /CONC	M	NW-SE	M	B/M	M	M
187	M	RET /CONC	B/M	NW-SE	A	B	M/A	M/A
379	M	CONC	B	N-S	A	B	A	A
564	M	CONC	M	NW-SE	M	A	M	B/M
592	M	CONV /RET	B/M	NW-SE	A	M	M	M
637	M	CONC	M/A	NW-SE	M/A	A	M	M/A
728	A	RET	B	NW-SE	A	B	M	B/M
810	M/A	RET /CONC	M	NW-SE	M/A	A	M	M/A
887	M	CONC	M	NW-SE	M	A	M	A
916	M	RET	M	NW-SE	B	B	M	A

10. Trabalhos desenvolvidos

A análise dos atributos descritores do relevo no interior das celas amostrais do DCVO revela predomínio de declividades moderadas; encostas retilíneas/côncavas ou côncavas, anisotropia de relevo moderada com orientação preferencial na direção NW-SE; rugosidade do relevo moderada a alta, assim como índice de vegetação (NDVI); e densidade do relevo moderada. Nestas celas a angulosidade do relevo mostrou-se em todas as classes, não havendo predomínio de uma sobre as outras.

10.5.4. UPG 4 – Domínio de colinas suaves (DCS)

Mostrada no mapa de ocorrência de UPGs gerado por agrupamento de atributos na cor laranja (FIGURA 49), o domínio das colinas suaves (DCS) ocorre principalmente na bacia do rio Barigui, nas porções central e sul da área de pesquisa, sendo pouco relevante no contexto da bacia do Passaúna. Compreende um grande agrupamento de celas posicionadas nas áreas de meia encosta e nos interflúvios das bacias dos rios Barigui/Passaúna e Barigui/Belém (este no limite leste da área). O DCS está associado a presença de migmatitos do Complexo Atuba e aos sedimentos da Bacia de Curitiba, estes nas porções de interflúvio entre as bacias. É caracterizado por declividade baixas, em encostas com setores predominantemente retilíneos, onde a anisotropia de relevo é alta e multidirecional, com elementos lineares orientados nas mais diversas direções. A angulosidade de relevo é moderada a alta, enquanto a rugosidade mostra-se moderada a baixa e o índice de vegetação (NDVI) é baixo. Não há predomínio de uma classe específica de densidade do relevo, sendo este atributo bastante diverso.

As celas amostrais pertencentes ao DCS e as classes de atributos descritores do relevo desta unidade são mostradas no QUADRO 7.

A análise das celas escolhidas como amostras representativas do DCS revelou que esta unidade apresenta o predomínio da seguinte associação de atributos descritores do relevo: declividades moderadas em encostas retilíneas a retilíneo-côncavas; anisotropia de relevo moderada com orientação principal dos elementos lineares para NE-SW; rugosidade do relevo moderada; angulosidade do relevo baixa, assim como o NDVI e densidade de relevo moderada a alta.

10. Trabalhos desenvolvidos

QUADRO 7. Lista de celas amostrais do DCS, exibindo as classes de atributos descritores do relevo.

Cela amostral	Declividade	Curvatura em perfil	Anisotropia do relevo	Direção de anisotropia	Rugosidade do relevo	Angulosidade do relevo	Densidade do relevo	ND VI
28	B	RET	M	N-S	M	B	M	B
114	M	RET /CONC	M	NE-SW	M	B	IND*	B
117	M	RET	B	NE-SW	A	B	A	B
171	M	RET	M	NE-SW	A	B	A	B
428	M	RET /CONC	M	NE-SW	M	B	M	B
441	M	R	M	E-W	M	B	M	M/A
489	M	RET /CONC	M/A	NE-SW	M	B	M/A	B
561	M	CONC	M	NE-SW	M	B	M	M/A
757	M	RET	A	NE-SW	M	B	M	M/A
910	M	RET	M/A	N-S	M	B	M	A
* Indicador não calculado para esta cela por não atender as condições mínimas de elementos para análise de variância.								

10.5.5. UPG 5 – Domínio das vertentes em dissecação acentuada (DVDA)

O domínio das vertentes em dissecação acentuada (DVDA – UPG 5) foi delimitado, por agrupamento das classes de atributos descritores do relevo (em roxo na FIGURA 49), principalmente nos setores central e norte das bacias estudadas. Os principais agrupamentos de celas desta unidade ocorrem a norte, nas duas bacias, e, em agrupamentos menores, na região central da bacia do rio Passaúna.

Mostra como características o predomínio de feições de dissecação do relevo, ocorrendo tanto em áreas de meia encosta como em divisores de água menores. Está associada à presença de migmatitos do Complexo Atuba, na região central, e a metapelitos do Grupo Açungui, a norte. São terrenos com

10. Trabalhos desenvolvidos

declividades moderada a alta, com vertentes predominantemente convexas. Mostra anisotropia de relevo baixa a moderada, porém sem orientação preferencial das feições lineares. A angulosidade e o índice de vegetação são moderados a alto, enquanto a densidade de relevo é baixa. Não há predomínio de uma classe de rugosidade frente às demais, sendo esta bastante diversa.

No QUADRO 8 são mostradas as características das celas amostrais do DVDA quanto às classes de atributos descritores do relevo presentes nas celas amostrais.

QUADRO 8. Lista de celas amostrais do DVDA, exibindo as classes de atributos descritores do relevo.

Cela amostral	Declividade	Curvatura em perfil	Anisotropia do relevo	Direção de anisotropia	Rugosidade do relevo	Angulosidade do relevo	Densidade de relevo	NDVI
920	A	CONV	M/A	N-S	M	B	M	A
836	M	RET	M	NE-SW	A	M	M	M/A
831	M	CONC	M	NE-SW	M/A	M	A	M/A
766	A	RET	M	NE	M/A	M	M	A
754	M	RET	M	N-S	M	B/M	M	A
762	A	CONC	M/A	NE-SW	M	M	M	A
605	M	CONC	M	NE-SW	M	M	M	M/A
533	M	CONV /RET	M	NE-SW	M	M	M	M/A
432	M	CONV /RET	B	NE-SW	A	M	M	A
311	M	CONC	M	NE-SW	A	M	B/M	A

A associação de classes de atributos descritores do relevo predominante para o DVDA, com base nas celas amostrais adotadas, é: declividades moderadas a altas, em encostas côncavas, retilíneas ou convexo-retilíneas; anisotropia de relevo moderada, em especial com as feições lineares orientadas na direção NE-SW; rugosidade, densidade e angulosidade do relevo moderados; além de índice de vegetação (NDVI) moderado a alto.

10.6. Análise de favorabilidade para a ocorrência das UPGs

Com base nos modelos conceituais construídos para as cinco UPGs adotadas para teste da metodologia proposta, pôde-se avaliar as classes de atributos descritores do relevo necessários e suficientes para a ocorrência de cada unidade. Estes conceitos revelaram o peso dos atributos dentro do contexto da probabilidade de ocorrência das UPGs, e dizem respeito à associação entre a presença ou ausência dos indicadores (atributos) e a ocorrência ou a não-ocorrência do evento (UPG).

Esta avaliação foi realizada individualmente para cada unidade, através da construção de duas planilhas. A primeira planilha diz respeito às observações, onde foram listadas todas as 926 celas da malha pretendida para o mapeamento e incluíram as informações geográficas (coordenadas UTM) de cada cela ao evento UPG. As celas amostrais da ocorrência da unidade foram marcadas com o valor “1”, enquanto as celas amostrais de locais onde se sabia *a priori* que a unidade em questão não estava presente, receberam o valor “-1” (10 celas). As demais celas, em número de 906, são os locais onde foi realizado o cálculo de probabilidade de ocorrer a unidade. A estas celas foi atribuído o valor “0” (zero), ou seja, a presença da UPG é incerta. O QUADRO 9 mostra um exemplo da configuração de uma planilha ternária construída para as observações da ocorrência de uma dada UPG (evento).

QUADRO 9. Exemplo da configuração de uma tabela ternária para a ocorrência de uma dada UPG.

Coord_X	Coord_Y	Cela	Presença da UPG
664520	7163520	1	0
663800	7164240	2	0
664520	7164240	3	-1
665240	7164240	4	0
663800	7164960	5	1
664520	7164960	6	1
665240	7164960	7	0
664520	7165680	8	0
665240	7165680	9	-1
664520	7166400	10	0
665240	7166400	11	0
665960	7166400	12	0
666680	7166400	13	0

10. Trabalhos desenvolvidos

Uma segunda planilha complementar é necessária, contendo as evidências (classes de atributos). Nesta planilha, as celas da malha para mapeamento são correlacionadas às celas da planilha de observações através da repetição das informações do número da cela e da posição geográfica (coordenadas). Adicionalmente são incorporadas as evidências, ou seja, as classes dos atributos descritores do relevo, cada classe em uma coluna distinta. Nesta configuração, cada cela apresenta um valor para cada evidência, sendo usados os valores “1” para a certeza da associação de uma dada cela à evidência, “-1” para a certeza da não-associação entre elas, e “0” (zero) quando há incerteza da informação. Conforme descrito anteriormente a incerteza da presença de uma dada evidência (em uma cela) corresponde à condição de que o valor absoluto do atributo esteja posicionado na faixa de valores que ocorre no limite entre duas classes adjacentes. Desta forma optou-se por introduzir um grau de liberdade à classificação, sendo que nestes casos o algoritmo assume que nesta cela estão presentes as duas evidências incertas (p.ex. declividade moderada e declividade alta). Um exemplo de parte de uma planilha de evidências é mostrado no QUADRO 10.

QUADRO 10. Exemplo da constituição da planilha de evidências para uma dada UPG, mostrando as classes de três atributos descritores do relevo.

X	Y	cela	decliv_b	decliv_m	decliv_a	prf_crv_cvx	prf_crv_ret	prf_crv_cnv	anisot_b	anisot_m	anisot_a
664520	7163520	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0	0
663800	7164240	2	-1	1	-1	0	0	-1	-1	0	0
664520	7164240	3	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0	0
665240	7164240	4	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
663800	7164960	5	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
664520	7164960	6	-1	1	-1	-1	0	0	-1	-1	1
665240	7164960	7	-1	1	-1	-1	0	0	-1	1	-1
664520	7165680	8	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0	0
665240	7165680	9	1	-1	-1	-1	0	0	-1	0	0
664520	7166400	10	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
665240	7166400	11	1	-1	-1	-1	0	0	-1	0	0
665960	7166400	12	0	0	-1	-1	1	-1	-1	0	0
666680	7166400	13	-1	1	-1	-1	0	0	-1	0	0
664520	7167120	14	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
665240	7167120	15	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0	0
665960	7167120	16	1	-1	-1	-1	0	0	-1	0	0
666680	7167120	17	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
667400	7167120	18	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1

Na planilha de evidências, exemplificada no QUADRO 10, são mostrados os atributos declividade, curvatura em perfil (prf_crv_) e anisotropia de relevo, classificados nas categorias alta (A), moderada (M) e baixa (B),

10. Trabalhos desenvolvidos

exceto a curvatura em perfil, classificada em vertentes convexas, retilíneas ou côncavas. Tomando como exemplo a cela 8, percebemos que nela ocorre declividade moderada (M) e as vertentes são retilíneas, porém há incerteza quanto a anisotropia de relevo, que foi classificada como moderada e alta (valor zero nas duas colunas).

Com base nestas informações o algoritmo de análise de favorabilidade determina os pesos de cada indicador (classe) para a ocorrência da UPG em questão, com base nas relações entre as frequências observadas entre os indicadores e a ocorrência da unidade, o que resulta na geração de um modelo probabilístico da ocorrência do evento UPG. Por fim o modelo probabilístico é então aplicado para avaliação da favorabilidade cela a cela para ocorrência do evento UPG. Em cada cela, ao final do processo é apresentada a probabilidade de ocorrência do evento UPG com base no modelo probabilístico e nas evidências presentes.

10.7. Composição dos modelos probabilísticos

O modelo probabilístico de existência de uma UPG consiste na modificação da chance prévia de sua ocorrência, em virtude da combinação das evidências, tanto ausentes como presentes, representadas pelos atributos descritores do relevo. A chance prévia, por sua vez, é a razão entre a probabilidade de que esta UPG ocorra e de que ela não ocorra, desconsideradas quaisquer evidências. O mapeamento das evidências não constitui um dado absoluto, pois há certo grau de confiabilidade tanto na amostragem de celas padrões, tidas como características das UPGs, como naquelas não-características, representadas por amostras das outras UPGs. Desta forma é atribuída uma medida de confiabilidade para cada atributo mapeado, bem como para as observações.

Cada uma das cinco UPGs, caracterizadas através de modelos conceituais, foi contemplada por duas planilhas (observações e evidências) que foram integradas pelo algoritmo de análise de favorabilidade para prever a probabilidade de cada cela pertencer às UPGs. No final do processamento foram geradas cartas de predição individuais da ocorrência das UPGs, onde cada cela foi classificada quanto à probabilidade de correspondência com o

10. Trabalhos desenvolvidos

modelo conceitual adotado para a unidade, com limites extremos de probabilidade zero (nenhuma correspondência) e 1 (correspondência total).

Os resultados foram avaliados de forma a testar a correspondência das celas com elevada probabilidade de pertencer à UPG ao modelo conceitual adotado. Classificações consideradas insatisfatórias implicaram na revisão do modelo conceitual, no que tange à determinação dos atributos necessários e suficientes para a ocorrência da UPG, posteriormente seguida por nova etapa de análise de favorabilidade. Por fim, após atingida elevada correspondência entre os modelos probabilísticos e conceituais, foram gerados mapas de probabilidade de ocorrência da UPG, onde cada cela exibe a probabilidade desta pertencer à unidade.

10.7.1. Aplicação do modelo probabilístico

Para fazer a predição da ocorrência das unidades a partir das características dos atributos descritores do relevo, os modelos probabilísticos de cada UPG foram obtidos conforme os pesos determinados pelo algoritmo utilizado. Como referência para as predições foi utilizada a mesma malha regular, composta por 926 celas quadradas com lados medindo 720m, onde em cada cela foi avaliada a chance *a posteriori* e a probabilidade para a ocorrência das UPGs.

Os modelos probabilísticos das cinco UPGs foram concebidos para a mesma área geográfica na qual foram gerados os modelos conceituais das unidades. Desta forma, para as celas onde se desejava mapear a probabilidade de ocorrência do evento UPG (não amostrais da presença ou da não-presença da unidade) e que apresentaram probabilidades acima de um dado valor crítico, passaram a ser considerados locais com expectativa de ocorrer esta unidade.

A chance prévia de ocorrência de cada evento UPG foi mantida em 1 (50% de probabilidade de pertencer e 50% de não pertencer). Considera-se, nos resultados, que para um dado evento (UPG) a soma da probabilidade de ocorrência, a probabilidade de não-ocorrência e a ambiguidade (incerteza) são complementares, ou seja, somam o valor 1 (FIGURA 50). Os resultados deste procedimento são apresentados na forma de uma planilha, para cada unidade, onde constam as informações geográficas (coordenadas), número das celas e

10. Trabalhos desenvolvidos

os valores de necessidade, suficiência, ambiguidade e contraste entre a suficiência e a necessidade, calculados pelo algoritmo a partir das evidências fornecidas (indicadores descritores do relevo). O QUADRO 11 apresenta, de forma teórica, a relação entre os valores de necessidade e suficiência das evidências para a ocorrência de um evento (E).

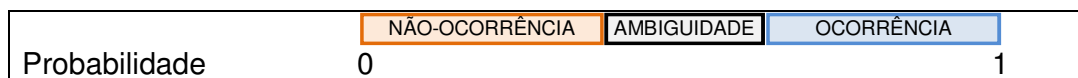


FIGURA 50. Representação gráfica da soma complementar entre as probabilidades de não-ocorrência, de ocorrência de um dado evento e da ambiguidade (probabilidade de ocorrência e de não-ocorrência simultâneas)

Merece destaque nesta proposta metodológica para cartografia das unidades de paisagem geomórficas o cálculo da ambiguidade dos resultados, representando um diferencial em relação às técnicas usuais (p.ex. aplicação de redes neurais ou sobreposição de cartas temáticas). A ambiguidade se refere ao grau de confiança do resultado probabilístico exibido. É produto da incerteza da informação utilizada nos cálculos e representa a probabilidade simultânea de ocorrência e de não-ocorrência do evento UPG.

QUADRO 11. Relação entre os valores de necessidade e suficiência para o cálculo da probabilidade de ocorrência de um dado evento (UPG), onde “p” é a probabilidade; “H” é a ocorrência do evento; “nH” é a não-ocorrência do evento; “Hi” é a incerteza da ocorrência do evento; “E” é a presença do atributo; e “nE” é a ausência do atributo.

	NECESSIDADE	SUFICIÊNCIA
VALORES POSITIVOS	<p>Estando AUSENTE o atributo, a probabilidade de que ocorra o evento é MAIOR de que a probabilidade de que não ocorra:</p> $p(H nE) > p(nH nE)$	<p>Estando PRESENTE o atributo, a probabilidade de que ocorra o evento é MAIOR de que a probabilidade de que não ocorra:</p> $p(H E) > p(nH E)$
VALORES NEGATIVOS	<p>Estando AUSENTE o atributo, a probabilidade de que não ocorra o evento, ou que a ocorrência seja incerta, é MAIOR de que a probabilidade de que ocorra:</p> $p(H nE) < p[(nH+Hi) nE]$	<p>Estando PRESENTE o atributo, a probabilidade de que ocorra o evento é MENOR de que a probabilidade de que não ocorra, ou que a ocorrência seja incerta:</p> $p(H E) < p[(nH+Hi) E]$

10. Trabalhos desenvolvidos

10.7.2. UPG 1 - Domínio das vertentes suaves (DVS)

Os resultados obtidos para o mapeamento do Domínio das vertentes suaves (DVS), conforme apresenta a TABELA 4, mostram o peso que cada atributo (evidência) utilizado representou na concepção do modelo probabilístico da unidade. Maiores valores de contraste indicam maior peso da evidência no cálculo da probabilidade de ocorrência da unidade (DVS). Desta forma aumenta a probabilidade de ocorrer o DVS quando estão presentes, na cela avaliada, principalmente as seguintes características: rugosidade e declividade baixas, além de NDVI moderado, densidade de relevo baixa, encostas com perfis predominantemente côncavos e direção de anisotropia N-S.

TABELA 4. Resultados da análise de favorabilidade das evidências para ocorrência do domínio das vertentes suaves (DVS), em ordem decrescente de contraste.

	NECESSIDADE	SUFICIÊNCIA	AMBIGUIDADE	CONTRASTE
	$\text{Log } p(nP/nE)/p(P/nE)$	$\text{Log } p(P/E)/p(nP/E)$		Necessidade + Suficiência
Rugosidade baixa	2,20	9,10	0,00	11,30
Declividade baixa	0,81	8,29	0,20	9,10
NDVI moderado	-0,25	6,91	0,00	6,66
Densidade baixa	0,34	1,39	0,10	1,72
NDVI baixo	0,41	1,10	0,00	1,50
Perfil côncavo	0,00	1,39	0,10	1,39
Direção de anisotropia N-S	0,56	0,69	0,00	1,25
Angulosidade baixa	0,69	0,22	0,20	0,92
Anisotropia alta	0,13	0,69	0,10	0,83
Densidade moderada	0,00	0,22	0,10	0,22
Direção de anisotropia E-W	0,00	0,00	0,00	0,00
Anisotropia baixa	-0,11	0,00	0,00	-0,11
Angulosidade moderada	0,29	-0,69	0,30	-0,41
Declividade moderada	-0,29	-0,22	0,20	-0,51
Direção de anisotropia NW-SE	-0,13	-0,41	0,00	-0,54
Perfil retilíneo	-0,69	0,00	0,30	-0,69
Anisotropia moderada	-0,69	0,00	0,10	-0,69
NDVI alto	-0,56	-0,51	0,00	-1,07
Direção de anisotropia NE-SW	-0,25	-1,10	0,00	-1,35
Angulosidade alta	-0,29	-1,39	0,10	-1,67
Rugosidade moderada	-0,81	-1,61	0,00	-2,42
Perfil convexo	0,00	-6,91	0,20	-6,91
Densidade alta	-0,36	-8,01	0,00	-8,36
Declividade alta	-0,51	-8,01	0,00	-8,52
Rugosidade alta	-0,51	-8,29	0,00	-8,80

Para as evidências mais significativas (com elevado contraste) os valores de ambiguidade são baixos, indicando confiabilidade quanto à definição do peso de cada atributo na construção do modelo probabilístico.

A FIGURA 51 apresenta o mapa do modelo probabilístico para ocorrência do domínio das vertentes suaves (DVS). À esquerda são mostradas, através de classes de cores, as faixas de chances calculadas de que cada cela pertença ao DVS, sobrepostos pela ocorrência da unidade mapeada pelo método estatístico de agrupamento por k-médias (asteriscos). A chance, em

10. Trabalhos desenvolvidos

uma dada cela, representa a razão entre a probabilidade de ocorrência do evento UPG pela probabilidade de não-ocorrência da unidade. Há grande correspondência entre as celas classificadas como pertencentes ao DVS, preliminarmente pelo método de agrupamento, e aquelas classificadas com maiores chances de pertencer a esta unidade. À direita os baixos valores de ambiguidade calculada atestam a confiabilidade da classificação ora apresentada, com a grande maioria dos valores situados abaixo de 0,4.

As celas com maiores chances de pertencerem à unidade DVS ocorrem na bacia do rio Barigui, especialmente em seu baixo curso, onde estão concentradas celas com valores mais expressivos. Na bacia do rio Passaúna as chances calculadas são menores, exceto em algumas celas dispersas, junto ao interflúvio a oeste.

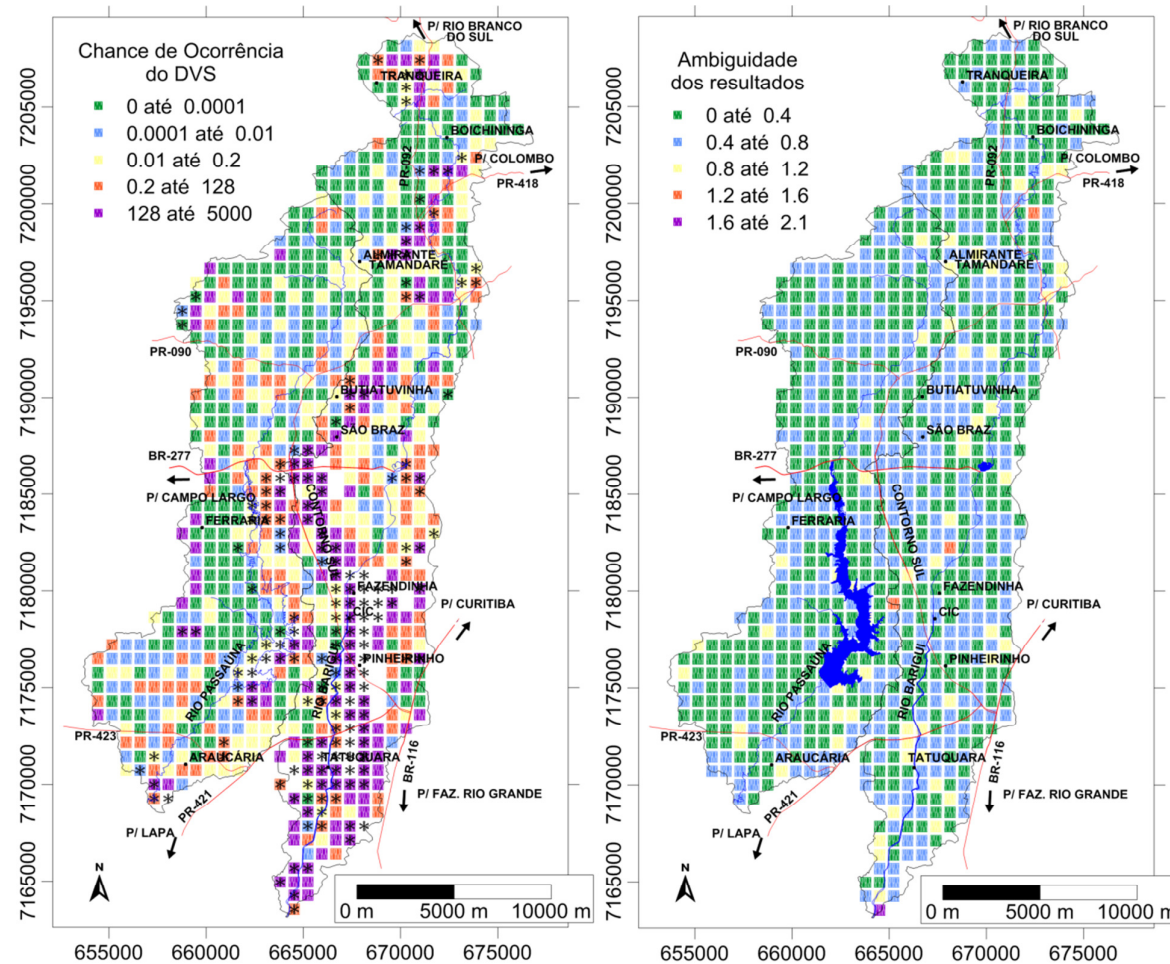


FIGURA 51. À esquerda: mapa de chance de ocorrência do domínio das vertentes suaves (DVS), sobreposto pelas celas identificadas como pertencendo ao domínio pelo método de agrupamento (k-médias – pontos). À direita: o mapa de ambiguidade da análise de favorabilidade.

10. Trabalhos desenvolvidos

10.7.3. UPG 2 - Domínio das vertentes esculpidas (DVE)

No caso do domínio das vertentes esculpidas os atributos com os maiores valores de contraste, ou seja, aqueles que quando presentes em uma dada cela aumentam a probabilidade de que esta pertença ao DVE, são: angulosidade alta, rugosidade moderada, anisotropia de relevo alta, índice de vegetação (NDVI) moderado, e declividade moderada (TABELA 5).

TABELA 5. Resultados da análise de favorabilidade para ocorrência do domínio das vertentes esculpidas (DVE), em ordem decrescente de contraste.

	NECESSIDADE	SUFICIÊNCIA	AMBIGUIDADE	CONTRASTE
	$\text{Log } p(nP/nE)/p(P/nE)$	$\text{Log } p(P/E)/p(nP/E)$		Necessidade + Suficiência
Angulosidade alta	9,10	2,30	0,00	11,41
Rugosidade moderada	8,70	1,20	0,00	9,90
Anisotropia alta	0,69	8,01	0,20	8,70
NDVI moderado	0,29	7,60	0,20	7,89
Densidade baixa	0,69	0,69	0,20	1,39
Declividade moderada	0,69	0,56	0,10	1,25
Direção de anisotropia N-S	0,34	0,51	0,00	0,85
Direção de anisotropia E-W	0,12	0,69	0,00	0,81
Direção de anisotropia NE-SW	0,13	0,41	0,00	0,54
Perfil retilíneo	0,41	0,00	0,50	0,41
Declividade alta	0,00	0,00	0,10	0,00
Anisotropia baixa	-0,11	0,00	0,00	-0,11
NDVI alto	0,18	-0,29	0,20	-0,11
Perfil convexo	-0,25	0,00	0,00	-0,25
Perfil côncavo	0,41	-0,69	0,50	-0,29
Densidade moderada	0,22	-0,51	0,30	-0,29
NDVI baixo	-0,56	-0,29	0,00	-0,85
Declividade baixa	-0,36	-7,60	0,00	-7,96
Rugosidade baixa	-0,36	-7,60	0,00	-7,96
Angulosidade moderada	-0,36	-7,60	0,00	-7,96
Densidade alta	-0,25	-8,01	0,10	-8,26
Anisotropia moderada	-8,01	-0,59	0,20	-8,59
Direção de anisotropia NW-SE	-0,51	-8,29	0,00	-8,80
Rugosidade alta	-0,51	-8,29	0,00	-8,80
Angulosidade baixa	-1,20	-8,70	0,00	-9,90

Na FIGURA 52, à esquerda, é mostrado mapa de chance de ocorrência do DVE (razão entre as probabilidade de ocorrência e de não-ocorrência da unidade), sobreposto pelas celas classificadas como pertencentes a esta unidade por análise de agrupamento (k-médias – pontos). Também é mostrada a ambiguidade dos resultados, à direita.

Também para esta unidade houve grande correspondência entre as duas classificações, com as celas referentes às maiores chances de ocorrência do DVE compatíveis com as celas indicadas pelo método de agrupamento.

Em relação às ambiguidades o modelo probabilístico aplicado para a classificação das celas mostrou resultados bastante diversos, porém ambiguidades elevadas, acima de 1,5, são raras.

10. Trabalhos desenvolvidos

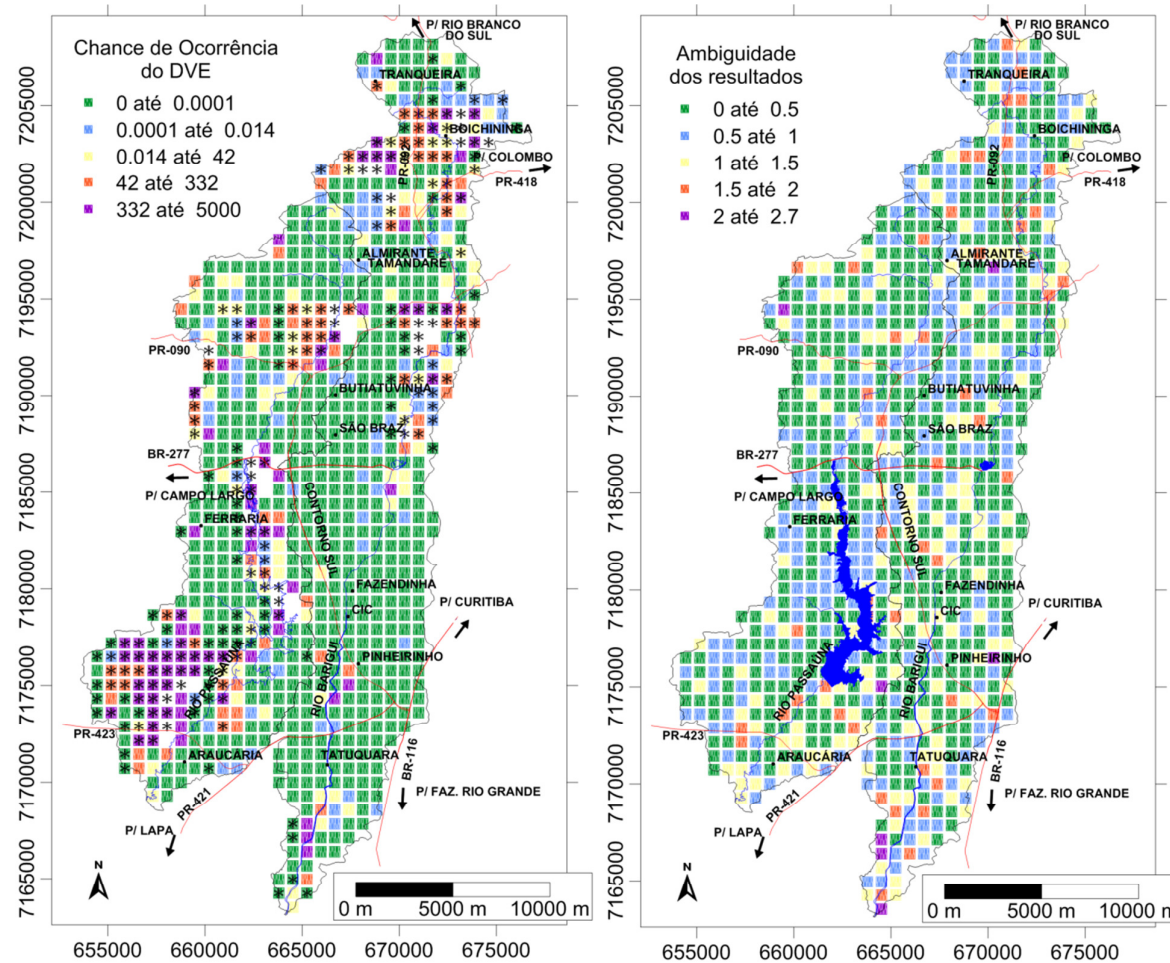


FIGURA 52. À esquerda: mapa de chance de ocorrência do domínio das vertentes esculpidas (DVE), sobreposto pelas celas identificadas como pertencendo à unidade por agrupamento (k-médias – pontos). À direita: o mapa de ambiguidade da análise de favorabilidade.

10. Trabalhos desenvolvidos

Na bacia do rio Barigui as celas apresentam, em geral, valores reduzidos de chance de ocorrência do DVE, exceto na porção de seu alto curso. Valores significativos são encontrados na bacia do rio Passaúna, em seu baixo curso, na margem direita, mas também no interflúvio entre as duas bacias (área central), e nas porções de cabeceira.

10.7.4. UPG 3 - Domínio das cristas e vales orientados (DCVO)

De acordo com os resultados da análise de favorabilidade, para o domínio das cristas e vales orientados (DCVO), os atributos com os maiores contrastes entre suficiência e necessidade calculados foram a anisotropia baixa e anisotropia moderada de relevo, seguidos por direção de anisotropia orientada na direção NW-SE, índice de vegetação (NDVI) alto, densidade de relevo alta e NDVI moderado (TABELA 6). A presença destes atributos em uma cela aumenta a chance de que o DCVO ocorra nesta cela, enquanto a ausência das evidências diminui esta chance.

TABELA 6. Resultados da análise de favorabilidade para ocorrência do domínio das cristas e vales orientados (DCVO), em ordem decrescente de contraste.

	NECESSIDADE	SUFICIÊNCIA	AMBIGUIDADE	CONTRASTE
	$\text{Log } p(nP/nE)/p(P/nE)$	$\text{Log } p(P/E)/p(nP/E)$		Necessidade + Suficiência
Anisotropia baixa	0,36	6,91	0,20	7,26
Anisotropia alta	0,12	6,91	0,10	7,03
Direção de anisotropia NW-SE	1,10	1,95	0,00	3,04
NDVI alto	0,69	0,92	0,10	1,61
Densidade alta	0,25	1,10	0,00	1,35
NDVI moderado	0,47	0,69	0,30	1,16
Perfil côncavo	0,18	0,69	0,10	0,88
Rugosidade alta	0,47	0,41	0,20	0,88
Declividade alta	0,29	0,41	0,10	0,69
Densidade moderada	0,51	0,18	0,10	0,69
Angulosidade alta	0,34	0,29	0,10	0,62
Declividade moderada	0,29	0,18	0,10	0,47
Perfil convexo	0,13	0,00	0,20	0,13
Direção de anisotropia NE-SW	0,00	0,00	0,00	0,00
Angulosidade baixa	-0,18	0,00	0,00	-0,18
Rugosidade moderada	0,00	-0,22	0,20	-0,22
Angulosidade moderada	-0,13	-0,69	0,10	-0,83
Rugosidade baixa	-0,25	-0,69	0,00	-0,94
Perfil retilíneo	-0,51	-0,69	0,30	-1,20
Direção de anisotropia E-W	-0,22	-7,60	0,00	-7,82
Declividade baixa	-0,36	-7,60	0,00	-7,96
Anisotropia moderada	-7,60	-0,59	0,30	-8,19
Densidade baixa	-0,41	-8,29	0,10	-8,70
Direção de anisotropia N-S	-0,51	-8,29	0,00	-8,80
NDVI baixo	-0,98	-8,70	0,20	-9,68

Cartograficamente os resultados da classificação das celas quanto à chance de ocorrência do DCVO (razão entre a probabilidade de ocorrência e

10. Trabalhos desenvolvidos

de não-ocorrência da unidade) é mostrada na FIGURA 53. Houve uma boa correspondência entre as celas determinadas como pertencentes a esta unidade entre os dois métodos aplicados, agrupamento e análise de favorabilidade.

A ambiguidade dos valores calculados (FIGURA 53 a direita) é baixa a moderada, menor que 1, em quase a totalidade da área de pesquisa. Valores de ambiguidade maiores que 1 são encontrados quase sempre em celas unitárias dispersas no interior de zonas com menores ambiguidades.

É nítida a diferença dos valores de chance entre as duas bacias estudadas. Na bacia do rio Barigui ocorrem as menores chances de ocorrência do DCVO, enquanto na bacia do rio Passaúna as chances são maiores. Nesta última percebe-se que os valores da chance de ocorrência da unidade são bastante variados, refletindo, provavelmente, a condição de gradativa perda da assinatura geomórfica da UPG, a partir de sua zona central, mais característica.

10. Trabalhos desenvolvidos

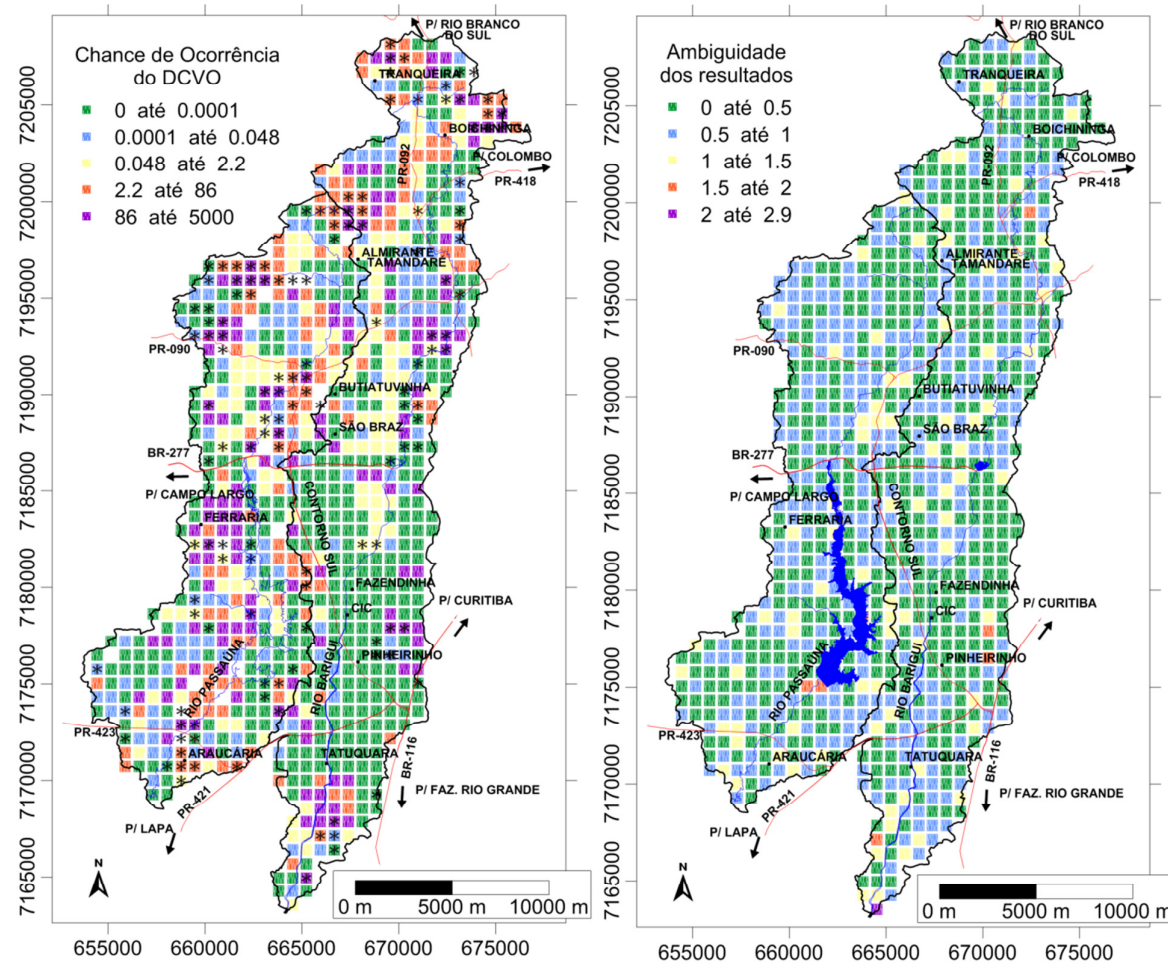


FIGURA 53. À esquerda: mapa de chance de ocorrência do domínio das cristas e vales orientados (DCVO), sobreposto pelas celas identificadas como pertencendo à unidade por agrupamento (k-médias – asteriscos). À direita: o mapa de ambiguidade da análise de favorabilidade.

10. Trabalhos desenvolvidos

10.7.5. UPG 4 – Domínio de colinas suaves (DCS)

Para o domínio de colinas suaves (DCS) os atributos com maior peso na ocorrência da unidade foram declividade moderada, densidade de relevo alta, angulosidade baixa e rugosidade moderada (TABELA 7). Entendem-se os elevados valores de contraste entre a necessidade e a suficiência destes atributos implicando que quando presentes, estas evidências aumentam a chance de que ocorra a unidade na cela em análise, enquanto a ausência diminui esta chance.

TABELA 7. Resultados da análise de favorabilidade para ocorrência do domínio de colinas suaves (DCS), em ordem decrescente de contraste.

	NECESSIDADE	SUFICIÊNCIA	AMBIGUIDADE	CONTRASTE
	Log p(nP/nE)/p(P/nE)	Log p(P/E)/p(nP/E)		Necessidade + Suficiência
Declividade moderada	8,29	0,29	0,20	8,58
Densidade alta	0,11	6,91	0,00	7,01
Angulosidade baixa	1,79	0,98	0,10	2,77
Rugosidade moderada	1,61	0,34	0,20	1,95
Densidade moderada	1,39	0,15	0,20	1,54
Perfil convexo	0,29	0,69	0,20	0,98
NDVI baixo	0,69	0,18	0,20	0,88
Direção de anisotropia E-W	0,12	0,69	0,00	0,81
Direção de anisotropia NW-SE	0,12	0,69	0,00	0,81
Anisotropia alta	0,00	0,69	0,00	0,69
Anisotropia baixa	0,11	0,00	0,10	0,11
Direção de anisotropia NE-SW	0,00	0,00	0,00	0,00
Perfil retilíneo	0,00	-0,51	0,40	-0,51
NDVI alto	-0,13	-0,41	0,00	-0,54
Perfil côncavo	0,00	-0,69	0,20	-0,69
Anisotropia moderada	-0,69	-0,13	0,10	-0,83
Angulosidade moderada	-0,13	-0,69	0,10	-0,83
Rugosidade baixa	0,00	-1,10	0,20	-1,10
Direção de anisotropia N-S	-0,25	-1,10	0,00	-1,35
NDVI moderado	0,00	-6,91	0,20	-6,91
Declividade baixa	0,00	-7,60	0,20	-7,60
Declividade alta	-0,22	-7,60	0,00	-7,82
Rugosidade alta	-0,22	-7,60	0,00	-7,82
Densidade baixa	-0,29	-8,29	0,20	-8,58
Angulosidade alta	-0,51	-8,29	0,00	-8,80

Quando analisados cartograficamente (FIGURA 54), os resultados da aplicação do modelo probabilístico para ocorrência do DCS (mais de 80% de probabilidade) mostram moderada correspondência com as celas da mesma unidade indicadas pelo método de agrupamento (k-médias). Apesar da correspondência ter sido apenas moderada entre os resultados dos dois métodos de classificação comparados, as características locais da unidade junto aos divisores de água das bacias dos rios Passaúna/Barigui e Barigui/Belém (a leste) são compatíveis, bem como o predomínio da unidade nas porções central e sul da bacia do rio Barigui, sendo esta praticamente

10. Trabalhos desenvolvidos

ausente na bacia do Passaúna. Também, a característica de gradativa redução da chance de ocorrência do DCS, a partir do núcleo de setores mais propícios foi evidenciada.

As ambiguidades dos resultados são, em geral moderadas a baixas, com raros valores elevados e na forma de celas isoladas, dispersas pela área de pesquisa, o que indica a alta confiabilidade dos resultados.

10. Trabalhos desenvolvidos

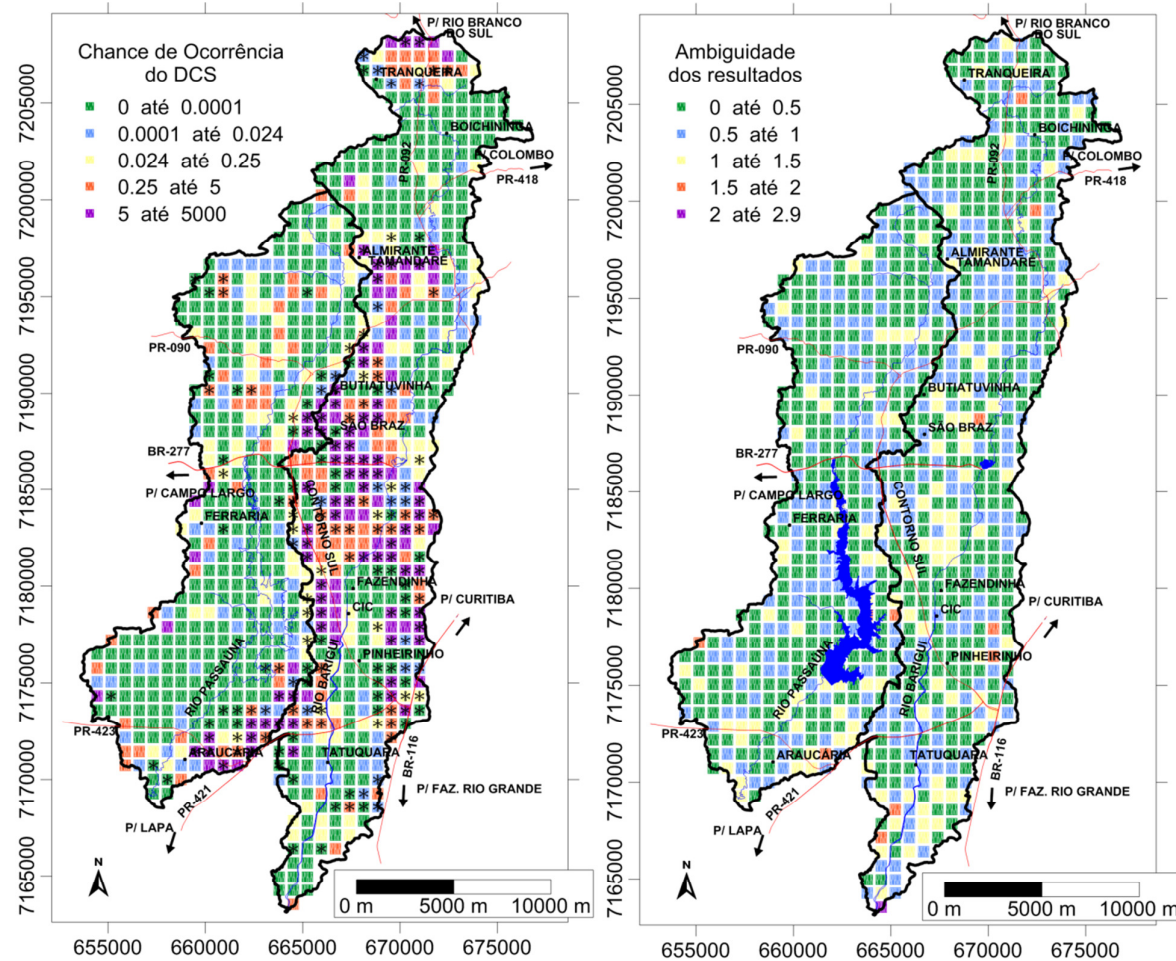


FIGURA 54. À esquerda: mapa de chance de ocorrência do domínio de colinas suaves (DCS), sobreposto pelas celas identificadas como pertencendo à unidade por agrupamento (k-médias – pontos). À direita: o mapa de ambiguidade da análise de favorabilidade.

10. Trabalhos desenvolvidos

10.7.6. UPG 5 – Domínio das vertentes em dissecação acentuada (DVDA)

A análise de favorabilidade para ocorrência do domínio das vertentes em dissecação acentuada (DVDA) mostrou maiores valores de contraste entre a necessidade e a suficiência para as evidências (atributos) rugosidade alta, densidade de relevo moderada, anisotropia baixa, angulosidade moderada, índice de vegetação (NDVI) alto, direção de anisotropia E-W e declividade moderada (TABELA 8). Enquanto a presença destas evidências aumenta a chance prévia de ocorrência da unidade em uma dada cela, a ausência destas reduz a chance de que a cela pertença ao DVDA.

TABELA 8. Resultados da análise de favorabilidade para ocorrência do domínio das vertentes em dissecação acentuada (DVDA), em ordem decrescente de contraste.

	NECESSIDADE	SUFICIÊNCIA	AMBIGUIDADE	CONTRASTE
	Log p(nP/nE)/p(P/nE)	Log p(P/E)/p(nP/E)		Necessidade + Suficiência
Rugosidade alta	0,92	8,70	0,00	9,62
Densidade moderada	8,29	0,51	0,00	8,80
Anisotropia baixa	0,11	6,91	0,00	7,01
Angulosidade moderada	2,08	2,20	0,00	4,28
NDVI alto	1,39	1,10	0,20	2,48
Direção de anisotropia E-W	0,25	1,10	0,00	1,35
Declividade moderada	1,10	0,15	0,20	1,25
Perfil convexo	0,13	0,69	0,10	0,83
Declividade alta	0,25	0,00	0,20	0,25
Perfil côncavo	0,15	0,00	0,20	0,15
NDVI moderado	0,13	0,00	0,20	0,13
Direção de anisotropia NE-SW	0,00	0,00	0,00	0,00
Direção de anisotropia NW-SE	0,00	0,00	0,00	0,00
Densidade alta	0,00	0,00	0,00	0,00
Anisotropia moderada	0,00	-0,15	0,20	-0,15
Anisotropia alta	0,00	-0,69	0,20	-0,69
Perfil retilíneo	-0,29	-0,51	0,30	-0,80
Rugosidade moderada	-0,69	-0,56	0,00	-1,25
Direção de anisotropia N-S	-0,25	-1,10	0,00	-1,35
Angulosidade baixa	-0,59	-1,39	0,00	-1,97
NDVI baixo	-1,10	-1,79	0,00	-2,89
Declividade baixa	-0,36	-7,60	0,00	-7,96
Rugosidade baixa	-0,36	-8,01	0,00	-8,36
Angulosidade alta	-0,51	-8,29	0,00	-8,80
Densidade baixa	-0,51	-8,29	0,00	-8,80

Cartograficamente a correspondência entre as celas mapeadas estatisticamente (asteriscos) e aquelas com maiores chances (razão entre a probabilidade de ocorrer e de não ocorrer a unidade) de ocorrência do DVDA é elevada (FIGURA 55). Estas ocorrem em grupos de celas mais desenvolvidos na porção centro norte da bacia do rio Passaúna, com gradativa redução das chances para a periferia. Na bacia do rio Barigui ocorrem agrupamentos de poucas celas (com chance elevadas), na porção norte.

10. Trabalhos desenvolvidos

Em relação à confiabilidade dos resultados, a análise de favorabilidade resultou em valores moderados a baixos de ambiguidades (FIGURA 55, a direita), mostrando que houve baixa incerteza quanto aos resultados probabilísticos.

10. Trabalhos desenvolvidos

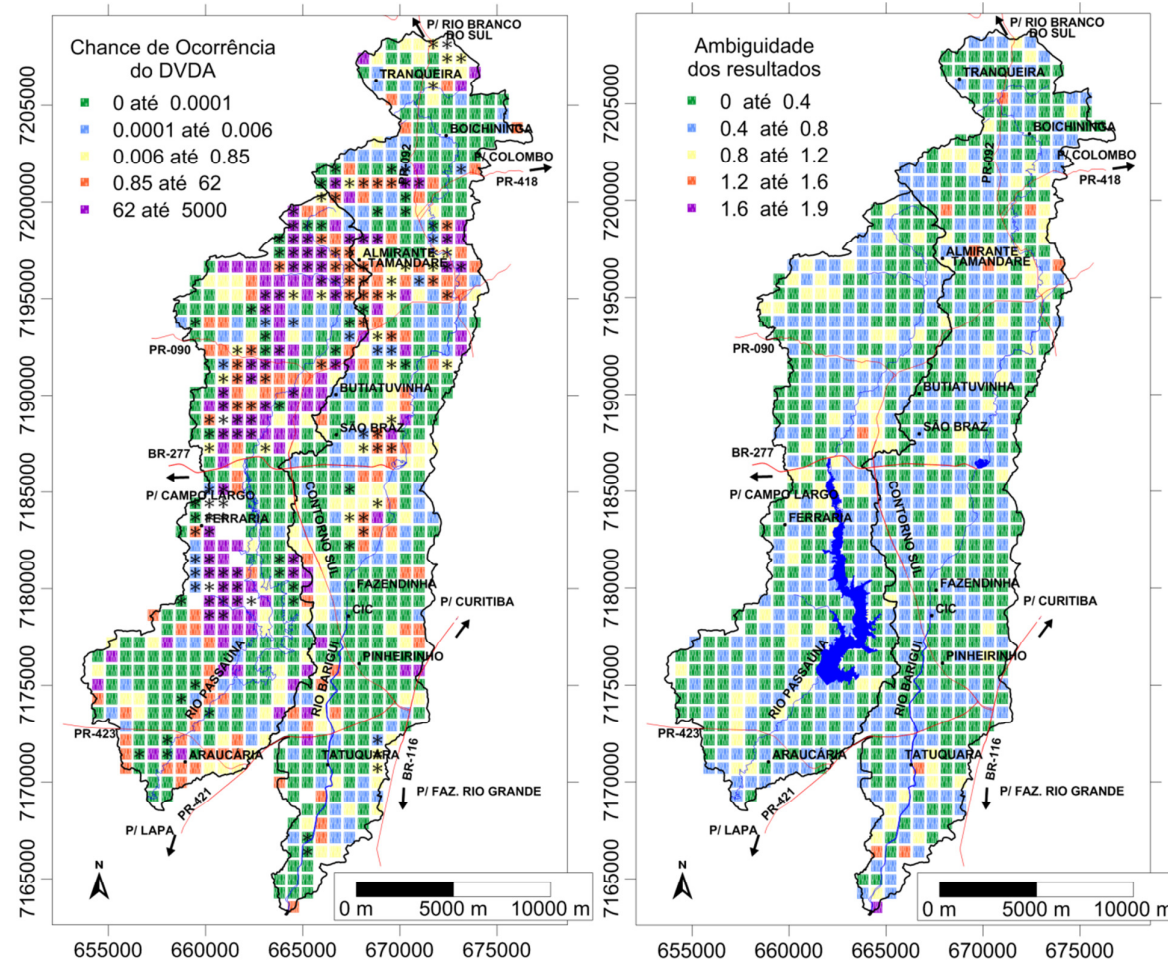


FIGURA 55. À esquerda: mapa de chance de ocorrência do domínio das vertentes em dissecação acentuada (DVDA), sobreposto pelas celas identificadas como pertencendo à unidade por agrupamento (k-médias – pontos). À direita: o mapa de ambiguidade da análise de favorabilidade.

10.8. Mapa das Unidades de Paisagem Geomórficas das bacias dos rios Passaúna e Barigui

A integração dos valores de probabilidade e de ambiguidade calculados para as a ocorrência das unidades em cada cela permitiu a geração de um Mapa de Unidades de Paisagem para as bacias dos rios Passaúna e Barigui (FIGURA 56), a partir da maior chance *a posteriori* estimada de ocorrência de cada unidade.

Para este fim foram utilizados tanto os valores da chance de ocorrência das unidades em cada cela, ou seja, a razão entre probabilidade de ocorrência e a probabilidade de não ocorrência da UPG, como os valores de ambiguidade. A determinação da chance *a posteriori* de ocorrência de cada unidade foi calculada conforme a equação abaixo:

$$Ch = \frac{p(H)-Amb}{1-[p(H)-Amb]} \quad (17)$$

Onde: “Ch” é a chance *a posteriori* de ocorrência do evento UPG; “p(H)” é a probabilidade condicional estimada de ocorrência do evento UPG; e “Amb” é a ambiguidade do resultado.

Com base nos valores de chance *a posteriori* de ocorrência de cada unidade, foi eleita, em cada cela, a unidade com a maior chance de ocorrência em relação às demais. Desta forma o mapa da das unidades de paisagem geomórfica das bacias dos rios Passaúna e Barigui (FIGURA 56 e Anexo 3, na escala de 1:50.000) representa, em cada cela, a unidade de paisagem geomórfica que apresentou a maior chance de ocorrência, cuja determinação é fundamentada na análise de favorabilidade para a ocorrência de todas as UPGs, em função da associação de atributos descritores do relevo.

De modo a representar as relações entre a topografia, a geologia da área de pesquisa, as feições associadas às paleosuperfícies latossólicas (PS1/Pd1) e húmicas (PS2/Pd2) e as unidades de paisagem geomórficas mapeadas foram construídos quatro perfis geológicos simplificados (FIGURA 57).

10. Trabalhos desenvolvidos

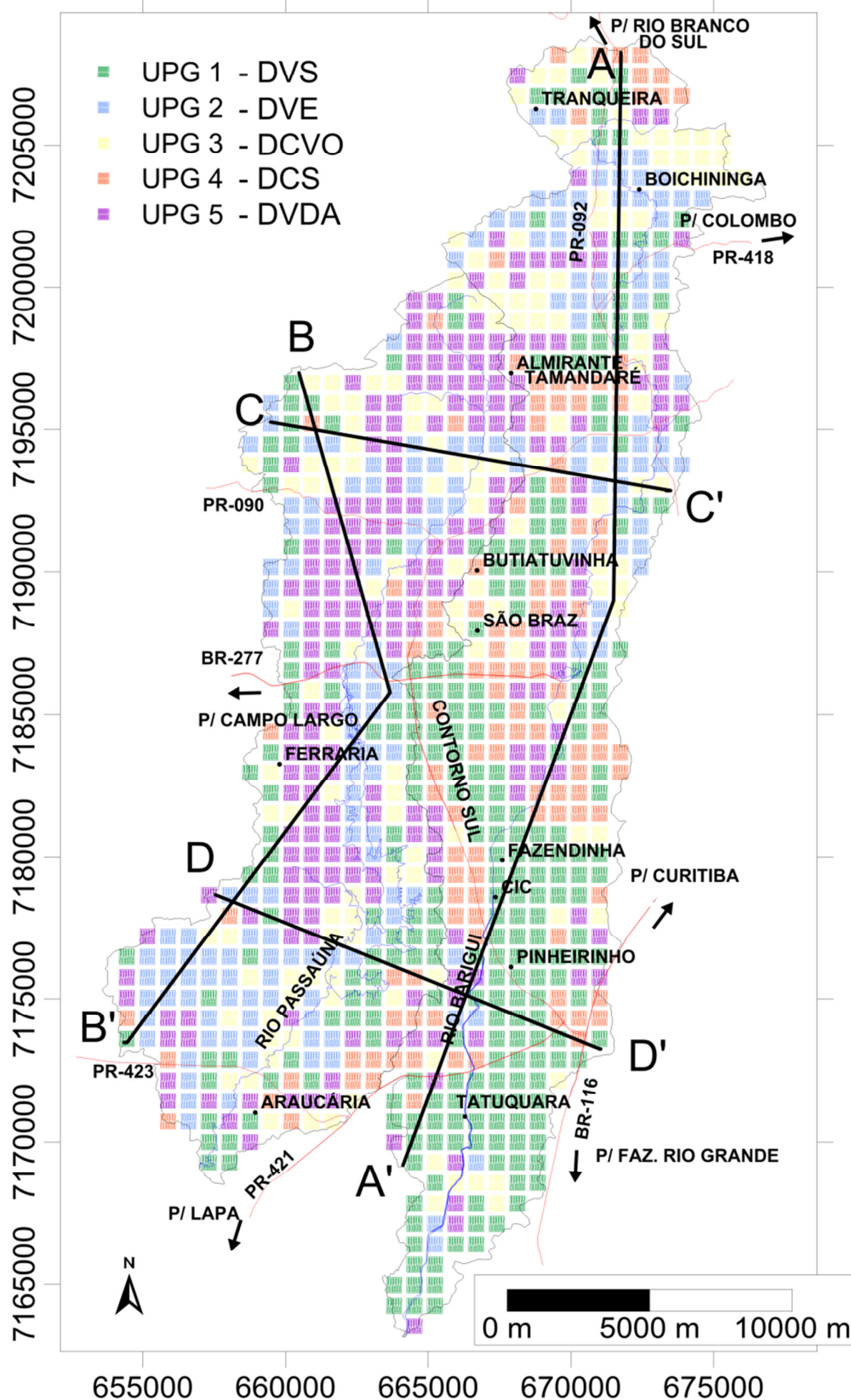


FIGURA 56. Mapa de unidades de paisagem das bacias dos rios Barigui e Passaúna, a projeção em planta dos perfis geológicos simplificados elaborados.

10. Trabalhos desenvolvidos

FIGURA 57. Perfis geológicos simplificados.

11. Discussão dos resultados

Como nova alternativa metodológica para cartografia de Unidades de Paisagem Geomórficas, duas premissas merecem destaque no desenvolvimento do presente trabalho: a proposta de automatização do processo de cartografia das UPGs e, em decorrência da automatização, a redução da variabilidade empírica neste processo.

Entende-se que as UPGs são entidades intrínsecas ao meio natural e, embora constituídas por uma série de atributos descritores do relevo, são maiores que o somatório destas partes. Esta característica é compatível com a teoria gestáltica, onde não é possível conhecer o todo por meio de suas partes, pois o todo é maior que a soma de suas partes. Nestes termos, não é o cruzamento ou intersecção dos diversos atributos descritores do relevo *per se* que irão distinguir as diferentes unidades de paisagem geomórfica. As diversas opções de técnicas para cartografia das UPGs (p.ex. sobreposição de mapas, fotointerpretação, redes neurais ou a metodologia ora proposta), portanto, tentam identificar os limites destas unidades naturais. É importante destacar que a definição dos limites entre diferentes UPGs é função da escala de trabalho adotada, onde escalas maiores permitem distinguir unidades a partir de feições de maior detalhe, estas unidades que podem ser agrupadas em uma mesma unidade quando a mesma área passa a ser avaliada em uma escala menor.

Quanto à definição dos atributos que descrevem o relevo, Sampaio (2008) destaca a densidade de drenagem (proporcional à densidade de relevo), a rugosidade e a dissecação, esta última proporcional à angulosidade do relevo, apresentada neste trabalho, como os parâmetros mais comumente utilizados. Neste contexto os atributos descritores do relevo aplicados nesta proposta metodológica estão coadunados com aqueles apresentados por Sampaio (2008).

De forma a avaliar os atributos descritores do relevo através de um prisma não empírico, a metodologia proposta como alternativa para a cartografia das UPGs se baseia nas inter-relações entre os diversos elementos naturais (p.ex. declividade, anisotropia direcional e índice de vegetação). Uma vez que os diversos temas integrados na análise provêm de fontes de dados

11. Discussão dos resultados

distintos, ou passaram por processamentos diferentes, fez-se necessário integrá-los em uma malha regular única, mantendo-se a coerência da informação e sua representatividade espacial. Assim a opção por realizar o teste metodológico sobre uma malha regular, com celas quadradas de lados medindo 720m, permitiu avaliar a complexidade da estrutura horizontal da paisagem, uma vez que as dimensões originais das celas (dos atributos) eram bastante diminutas em relação a esta malha. De modo a ser mantida a representatividade espacial dos dados, a opção de reamostragem das malhas de atributos por aplicação de filtro de média móvel, com área de busca de 720 x 720m, não resultou em perdas significativas de resolução para este fim. Tal artifício reduziu as micro variações dos dados, ou seja, a influência local, focando assim a análise nas características predominantes na área de cada cela (720m).

Outra inovação da metodologia apresentada neste trabalho foi o artifício de realizar a interpretação de índices geomorfométricos a partir da análise da variância altimétrica regionalizada no entorno de cada cela. A aplicação de variogramas altimétricos direcionais proporcionou importantes elementos de distinção entre os diferentes padrões de relevo da área estudada. Estes atributos, integrados àqueles já consagrados para caracterização morfométrica da superfície terrestre (p.ex. declividade e curvatura das vertentes), resultaram em elementos importantes para o teste da metodologia proposta. Entendendo que a estrutura horizontal da paisagem geomórfica é o resultado da inter-relação dos componentes elementares (atributos - estrutura vertical), cada um com taxas de variação e tendências espaciais próprias, a derivação de novos atributos através do cálculo da variância regionalizada (pesquisada através de janelas móveis de busca) permitiu obter resultados relevantes para diferenciação dos compartimentos geomórficos presentes.

A aplicação dos variogramas regionalizados e consequente derivação dos atributos geomorfométricos (rugosidade, angulosidade e densidade de relevo, dimensão e ajuste da dimensão fractal, anisotropia e direção de anisotropia de relevo) segue o princípio da independência de escala de trabalho, e são, portanto, adimensionais. Esta característica é compatível com a metodologia de fotointerpretação geológica apresentada por Soares; Fiori (1976), na qual as diferentes texturas interpretadas em fotos aéreas compõem

11. Discussão dos resultados

zonas homólogas distintas, independentemente da escala das fotografias. O que muda, portanto, em escalas diferentes é a dimensão das zonas homólogas mapeadas, como função das dimensões dos elementos individualizáveis. De forma análoga, a derivação dos atributos geomorfométricos a partir do cálculo da variância regionalizada reflete, então, a resolução dos dados altimétricos de entrada. Uma vez que uma das prioridades da proposta metodológica ora apresentada é a possibilidade de sua replicação em outras áreas, com base em dados com ampla cobertura da superfície terrestre e disponíveis sem custos financeiros, considerou-se adequada a adoção dos dados altimétricos do sensor SRTM para a geração de novos atributos geomorfométricos.

Sampaio (2008) destaca que a adoção de parâmetros descritores do relevo impõe a necessidade de uma análise mais detalhada de suas características frente à finalidade do mapeamento e das restrições impostas pela metodologia aplicada, de modo a garantir a representatividade desejada dos resultados. Neste contexto os atributos aplicados neste trabalho mostraram-se eficientes na distinção dos diferentes compartimentos geomórficos presentes nas bacias dos rios Passaúna e Barigui. Através da análise individual dos atributos foi possível distinguir características relevantes para a individualização das unidades de paisagem geomórficas presentes, como, por exemplo, o domínio de processos de dissecação ou o controle geológico-estrutural do relevo.

Taborda (2010) comprovou que a análise paramétrica do relevo, com base em modelo digital do relevo, tem potencial para caracterização de relações relevo-solo, inclusive permitindo predizer a distribuição espacial das classes de solo em escala local. De maneira análoga, o trabalho ora apresentado mostrou que é possível, através da análise dos atributos descritores do relevo, distinguir compartimentos geomórficos controladores dos padrões de solos, de formações superficiais e de base litológica.

Apesar do objetivo da metodologia proposta ser a cartografia de unidades de paisagem geomórficas, ou seja, centrada nas características das formas do modelado, optou-se por incluir na análise variáveis influenciadas pelo componente antrópico da paisagem. Esta medida foi adotada no intuito de testar uma aproximação do objeto foco do mapeamento (UPG) ao conceito de unidades de paisagem naturais, o qual incorpora componentes socioambientais

11. Discussão dos resultados

aos elementos naturais da paisagem. Para tanto, a inclusão dos índices de vegetação (NDVI) de umidade (NDWI), ambos derivados do processamento de imagens orbitais do sensor TM do Landsat 5, também disponível gratuitamente para amplas áreas do planeta, revelou importante contribuição ao estudo, pois indica o grau de antropização, ou artificialização, do meio através da caracterização do grau de fragmentação da cobertura vegetal. Também revela o potencial da metodologia ora proposta para a incorporação de variáveis adicionais, como mapas de uso do solo, por exemplo, permitindo aplicá-las no mapeamento de inúmeros objetos-alvo.

De forma a aplicar a análise de favorabilidade para ocorrência das UPGs, através dos cálculos de probabilidade condicional, fez-se necessário atender à condição ideal de independência das variáveis (atributos) integradas. Com este objetivo a aplicação de testes de correlação entre os atributos, por meio da construção de uma matriz de similaridade, permitiu que fossem identificadas as principais relações de dependência, fornecendo assim critérios matemáticos para a exclusão/manutenção dos atributos. Como resultado, atributos empiricamente considerados importantes para a definição e distinção das UPGs precisaram ser eliminados, por conta de sua forte dependência com os demais elementos em análise. É o caso do atributo altitude, que mostrou-se com elevada correlação com os atributos declividade e com os índices de vegetação (NDVI) e de umidade (NDWI). Os índices de vegetação e umidade, de forma análoga, mostraram forte correlação, resultando na eliminação do último. Assim também foram eliminados os atributos curvatura em planta (correlação alta com curvatura em perfil) e dimensão fractal e ajuste da dimensão fractal, ambos com alta correlação com a rugosidade do relevo.

Apesar dos valores de coeficientes de correlação de Pearson acima de $\pm 0,4$ terem sido empiricamente considerados como limiar para a definição da interdependência entre os atributos, uma análise mais apurada revela uma característica relevante ao estudo em curso. Tomados como exemplo os atributos rugosidade e densidade de relevo, cujo coeficiente de correlação calculado foi de 0,511, percebe-se através da construção de um gráfico de dispersão (FIGURA 58) que o ajuste de uma linha de tendência, por regressão linear de primeira ordem, revela um baixo coeficiente de ajuste R^2 . Considerando a linha de tendência como um indicador de correlação perfeita,

11. Discussão dos resultados

ou seja, onde as duas variáveis são totalmente dependentes, o baixo valor de R^2 mostra que esta hipótese não é válida.

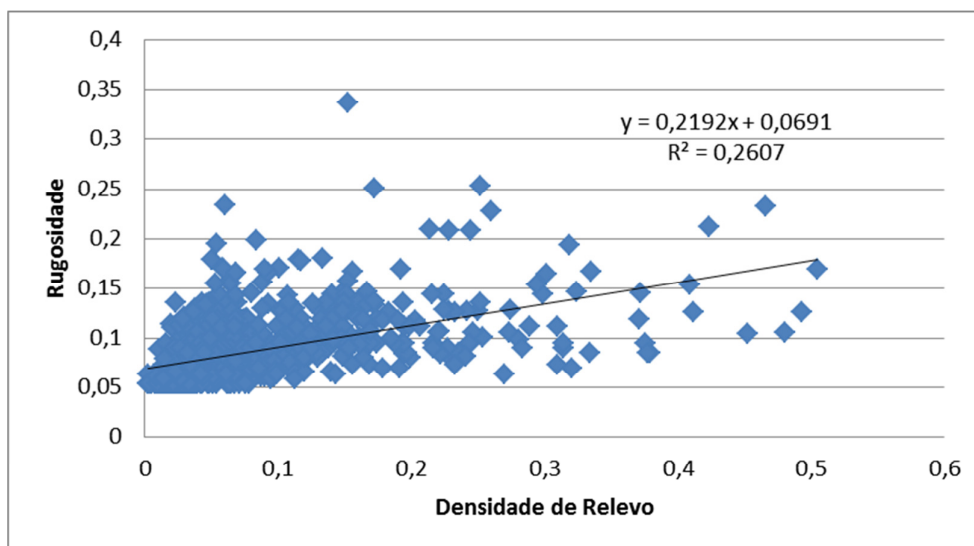


FIGURA 58. Gráfico de dispersão dos valores dos atributos rugosidade e densidade de relevo, mostrando uma linha de tendência onde o coeficiente de correlação de Pearson tem valor 1 e o ajuste dos dados à esta tendência (R^2).

Como passo seguinte para a análise de favorabilidade para a ocorrência das UPGs, a discretização dos dados em classes de atributos permitiu a incorporação do conceito de incerteza da informação. Valores situados no entorno do limite entre duas classes consecutivas foram interpretados pelo algoritmo de análise de favorabilidade como pertencentes às duas classes. Para tanto se utilizou, primeiramente a separação dos valores contínuos do atributo em três classes (baixa, moderada e alta), com base nos limites naturais de frequência dos dados. Em uma segunda etapa foi calculada o alcance de cada classe e tomado como limiar da incerteza uma proporção de 10% deste alcance, a partir dos limites entre classes adjacentes.

Este artifício evitou a decisão arbitrária de vincular um determinado valor em uma classe, quando este se situava próximo ao limite desta classe com outra adjacente. Neste caso a incerteza diz respeito tanto a possíveis erros de acurácia do dado (atributo) e/ou da determinação do limite entre as classes. Em relação aos resultados obtidos, a incorporação da incerteza proporcionou calcular os valores de ambiguidade dos resultados, ou seja, o quão confiável

11. Discussão dos resultados

foram as classificações obtidas, um avanço na cartografia de unidades de paisagem.

De modo a testar a eficácia da proposta metodológica apresentada, optou-se por buscar o mapeamento probabilístico de diferentes UPGs identificadas preliminarmente em campo e depois verificadas no modelo digital de elevação do terreno, através dos atributos descritores do relevo que as caracterizam. Conforme descrito anteriormente, as diversas alternativas para cartografia de UPGs tentam reproduzir os limites destas entidades, que *per se* representam elementos que integram diversos atributos descritores do relevo, mas que são maiores que a simples soma destes.

Como teste para a hipótese de trabalho, portanto, foram definidas cinco unidades alvo (UPGs), caracterizadas em campo e por seus atributos descritores do relevo, as quais revelaram um nível de distinção suficiente entre si, porém mantendo a coerência interna dos grupos em relação à associação dos atributos.

Após definido o número de cinco UPGs a serem mapeadas como teste metodológico, foi realizada uma análise de agrupamento das celas a partir dos atributos presentes. O objetivo desta nova classificação foi determinar a qual agrupamento cada cela da malha regular melhor se adequava. Isto se deu através de agrupamento por k-médias, aplicado sobre os atributos discretizados em classes para cada cela. Cada agrupamento representa, então, um domínio geomórfico que por sua vez foi interpretado como uma Unidade de Paisagem Geomórfica.

Com base na classificação das UPGs pelo método do agrupamento por k-médias foram refinados e definidos os modelos conceituais para as cinco UPGs classificadas, os quais foram fundamentados através da análise das amostras de celas características para cada unidade. De modo a adotar amostras com maior representatividade procurou-se selecionar aquelas que estivessem inseridas em um conjunto homogêneo de celas (mesma unidade), preferencialmente da região central dos agrupamentos.

A construção de cada modelo conceitual foi então realizada com base na análise dos atributos descritores do relevo verificados em dez amostras de celas pertencentes à unidade. Foram tomadas como representativas das unidades as características (atributos geomorfométricos) mais recorrentes nas

11. Discussão dos resultados

celas amostrais e que serviram para denominar cada unidade, conforme segue: UPG 1 - domínio das vertentes suaves (DVS); UPG 2 – domínio das vertentes esculpidas (DVE); UPG 3 – domínio das cristas e vales orientados (DCVO); UPG 4 – domínio de colinas suaves (DCS); e UPG 5 – domínio das vertentes em dissecação acentuada (DVDA).

Com base na amostragem de celas usadas para a construção dos modelos conceituais, procedeu-se a análise de favorabilidade para a ocorrência das UPGs. Para cada unidade, as dez amostras de celas representativas de sua ocorrência foram confrontadas com dez amostras das demais unidades, através da comparação das classes de atributos descritores do relevo presentes. A partir da associação de atributos característicos desta unidade, contraposta à associação dos atributos das demais, o algoritmo calculou a necessidade, a suficiência e o contraste (necessidade + suficiência) para cada atributo, quanto à ocorrência desta unidade. O valor do contraste entre a necessidade e a suficiência das classes de atributos (evidências) indica o peso matemático que estes representam na ocorrência de cada UPG. É com base nestes pesos que foi realizado o cálculo da probabilidade de que ocorra esta UPG em uma dada cela.

Operacionalmente, para o cálculo da probabilidade individual da presença de uma dada UPG em uma cela, o algoritmo buscou na planilha de evidências (atributos discretizados em classes) associações semelhantes àquela das amostras da ocorrência da unidade (e distintas das amostras de não-ocorrência), para o conjunto total de celas que compõem a área de pesquisa (926 celas). Como resultado, para cada UPG foi gerada uma planilha onde são indicados os valores da probabilidade de ocorrência desta unidade e a ambiguidade deste resultado para as 926 celas avaliadas.

A comparação entre os modelos conceituais e probabilísticos revela a robustez da classificação realizada. No decorrer do desenvolvimento do teste metodológico foram realizadas simulações de inserção e exclusão de atributos, o que resultou em diferentes classificações de UPGs por agrupamento (k-médias) e consequentes diferentes amostragens e modelos conceituais gerados. Foram realizadas análises de favorabilidade para a ocorrência das UPGs adotadas em cada teste e, posteriormente, comparados os modelos conceituais e probabilísticos. Conforme o fluxograma metodológico

11. Discussão dos resultados

apresentado anteriormente (FIGURA 10), incompatibilidades muito grandes entre estes dois modelos resultaram em revisões do modelo conceitual e posterior nova análise de favorabilidade e comparação entre os modelos.

Assim, quando alcançado um nível aceitável de compatibilidade entre os modelos, estes passaram a ser aceitos como viáveis para a avaliação da metodologia ora proposta. São estes modelos que foram apresentados neste trabalho. Como parâmetros de comparação foram confrontadas as características dos modelos conceituais e probabilísticos, através das classes de atributos descritores do relevo, conforme mostrado nos QUADRO 12 e QUADRO 13.

Um dos principais pontos da comparação entre os modelos conceituais e probabilísticos é a avaliação do peso de cada indicador na caracterização das unidades, a partir dos valores de contraste entre a necessidade e a suficiência das evidências (SOARES, 2000). Quanto maior o peso de um dado atributo, maior a importância deste na definição de uma dada unidade em relação aos demais. Com base nos pesos dos atributos é possível aceitar um nível de compatibilidade na comparação entre os dois modelos, com certo grau de liberdade para aparentes incompatibilidades para os demais atributos, com pesos menores.

O modelo conceitual do domínio das vertentes suaves (DVS - UPG 1) foi definido por conta de suas condições de declividade, rugosidade e densidade de relevo baixas. Embora não tenham sido contemplados no modelo conceitual, o índice de vegetação (NDVI) moderado, o predomínio de vertentes com perfil côncavo e a direção de anisotropia N-S mostraram-se como recorrentes e, por isso, tiveram elevado peso na definição do modelo probabilístico. Entende-se que nesta unidade as condições mais importantes (maiores pesos) são relacionadas às baixas rugosidade e declividade (maiores contrastes), caracterizando o DVS como terrenos aplainados, sem entalhamento significativo dos cursos d'água. Estas características indicam predomínio de processos de aggradação ou de dissecação pouco efetivos na atualidade. O alto peso atribuído ao índice de vegetação (NDVI) baixo mostra forte componente antrópico na unidade. Também a baixa densidade de relevo, para a condição climática local, indica condições de alta permeabilidade dos materiais da superfície.

11. Discussão dos resultados

QUADRO 12. Comparação entre os modelos conceituais e probabilísticos dos domínios das vertentes suaves (UPG 1 - DVS) e das vertentes esculpidas (UPG 2 - DVE).

UPG	MODELO CONCEITUAL	MODELO PROBABILÍSTICO CONTRASTE MAIOR QUE 1	CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS MODELOS CONCEITUAL E PROBABILÍSTICO	INCOMPATIBILIDADES ENTRE OS MODELOS CONCEITUAL E PROBABILÍSTICO
1 DVS	<ul style="list-style-type: none"> • Declividade baixa • Perfil retilíneo a convexo-retilíneo-côncavo • Anisotropia alta • Direção anisotropia NW-SE e N-S • Densidade baixa • Rugosidade baixa • Angulosidade moderada • NDVI baixo 	<ul style="list-style-type: none"> • Rugosidade baixa • Declividade baixa • NDVI moderado • Densidade baixa • Perfil côncavo • Direção de anisotropia N-S 	<ul style="list-style-type: none"> • Rugosidade baixa • Declividade baixa • Densidade baixa 	<ul style="list-style-type: none"> • NDVI moderado • Perfil côncavo • Direção de anisotropia N-S
2 DVE	<ul style="list-style-type: none"> • Declividade moderada a alta • Perfil retilíneo a côncavo • Anisotropia moderada a alta • Direção de anisotropia variada • Densidade baixa a moderada • Rugosidade moderada • Angulosidade alta • NDVI moderado a alto 	<ul style="list-style-type: none"> • Angulosidade alta • Rugosidade moderada • Anisotropia alta • NDVI moderado • Densidade baixa • Declividade moderada 	<ul style="list-style-type: none"> • Angulosidade alta • Rugosidade moderada • Anisotropia alta • NDVI moderada • Densidade baixa • Declividade moderada 	<ul style="list-style-type: none"> • Não houve

11. Discussão dos resultados

QUADRO 13. Comparação entre os modelos conceituais e probabilísticos dos domínios das cristas e vales orientados (UPG 3 - DCVO), de colinas suaves (UPG 4 - DCS) e das vertentes em dissecação acentuada (UPG 5 – DVDA).

UPG	MODELO CONCEITUAL	MODELO PROBABILÍSTICO CONTRASTE MAIOR QUE 1	CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS MODELOS CONCEITUAL E PROBABILÍSTICO	INCOMPATIBILIDADES ENTRE OS MODELOS CONCEITUAL E PROBABILÍSTICO
3 DCVO	<ul style="list-style-type: none"> • Declividade moderada • Perfil retilíneo a côncavo • Anisotropia moderada • Direção anisotropia NW-SE • Densidade moderada • Rugosidade moderada a alta • Angulosidade moderada • NDVI moderado a alto 	<ul style="list-style-type: none"> • Anisotropia baixa • Anisotropia moderada • Direção de anisotropia NW-SE • NDVI alto • Densidade alta • NDVI moderado 	<ul style="list-style-type: none"> • Anisotropia moderada • Direção de anisotropia NW-SE • NDVI alto • NDVI moderado 	<ul style="list-style-type: none"> • Anisotropia baixa • Densidade alta
4 DCS	<ul style="list-style-type: none"> • Declividade moderada • Perfil retilíneo a retilíneo-côncavo • Anisotropia moderada • Direção anisotropia NE-SW • Densidade moderada a alta • Rugosidade moderada • Angulosidade baixa • NDVI moderado a alto 	<ul style="list-style-type: none"> • Declividade moderada • Densidade alta • Angulosidade baixa • Rugosidade moderada 	<ul style="list-style-type: none"> • Declividade moderada • Densidade alta • Angulosidade baixa • Rugosidade moderada 	<ul style="list-style-type: none"> • Não houve
5 DVDA	<ul style="list-style-type: none"> • Declividade moderada a alta • Perfil côncavo, retilíneo ou convexo-retilíneo • Anisotropia moderada • Direção anisotropia NE-SW • Densidade moderada • Rugosidade moderada • Angulosidade moderada • NDVI moderado a alto 	<ul style="list-style-type: none"> • Rugosidade alta • Densidade moderada • Anisotropia baixa • Angulosidade moderada • NDVI alto • Direção de anisotropia E-W • Declividade moderada 	<ul style="list-style-type: none"> • Densidade moderada • Angulosidade moderada • NDVI alto • Declividade moderada 	<ul style="list-style-type: none"> • Rugosidade alta • Anisotropia baixa • Direção de anisotropia E-W

11. Discussão dos resultados

Ainda a respeito da análise da interdependência entre os atributos descritores do relevo, faz-se necessário avaliar os efeitos da exclusão do atributo altitude, decorrente dos elevados coeficientes de correlação com outras variáveis. Relações evidentes entre as altitudes e as declividades (áreas mais íngremes junto às nascentes dos rios Barigui e Passaúna) e com o uso do solo (remanescentes florestais mais preservados em áreas com maior altitude), foram identificados através dos elevados coeficientes de correlação calculados. Entretanto a exclusão do referencial altimétrico não permitiu ao algoritmo de análise de favorabilidade a diferenciação entre áreas com comportamento geomórfico semelhante, porém sabidamente pertencentes a distintos compartimentos da paisagem. Esta condição foi verificada no agrupamento na UPG 1 – Domínio das vertentes suaves – de terrenos pertencentes tanto às áreas de baixada junto às planícies dos rios Passaúna e Barigui, quanto alguns remanescentes das paleosuperfícies PS1/Pd1 e PS2/Pd2 (RIFFEL, 2006 e AB'SABER; BIGARELLA, 1961). A semelhança geomórfica entre estes dois compartimentos decorre do fato de que as atuais paleosuperfícies constituíam, quando de sua formação, planícies com características geodinâmicas compatíveis com as planícies atuais, ou seja, as formas de relevo tendem a ser recorrentes nos dois compartimentos.

Conforme identificado em Riffel (2006), as paleosuperfícies existentes na região ocorrem em faixas altimétricas bem definidas e mapeáveis através de critérios tais como a declividade baixa e diferença altimétrica em relação ao nível de base local. Entretanto seria esperado que a simples inclusão do atributo altitude, nos moldes dos demais atributos aplicados, ou seja, discretizados através da identificação dos limites de classes de frequências de valores não resultaria, necessariamente, na distinção entre as planícies atuais e as antigas (paleosuperfícies). Uma vez que as faixas de ocorrência das paleosuperfícies são conhecidas na região, a distinção entre planícies atuais e paleosuperfícies seria favorecida pela adoção de variáveis fundamentadas em faixas altimétricas esperadas. Esta condição, porém, diverge da proposta de automatização do processo de mapeamento das unidades de paisagem geomórfica, pois tornaria necessária a pré-existência de dados relativos às paleosuperfícies ou a aplicação da metodologia por profissional com

11. Discussão dos resultados

conhecimentos amplos sobre a geologia e geomorfologia da área, interpretando informações *a priori*.

Para o domínio das vertentes esculpidas (DVE) - UPG 2 – os modelos conceitual e probabilístico foram inteiramente compatíveis. Os atributos descritores do relevo com maior peso para aumentar a chance de ocorrência da unidade foram a angulosidade alta, rugosidade moderada, anisotropia de relevo alta, índice de vegetação (NDVI) moderado, densidade de relevo baixa e declividade moderada. Todos haviam sido identificados no modelo conceitual, com base na seleção de áreas homogêneas (zonas homólogas de relevo), a partir de caracterização em campo da associação de atributos descritores de relevo. Tais condições revelam a tendência ao entalhamento, desenvolvido pelo processo de erosão hídrica linear, o que causa a presença de angulosidade de relevo alta. Geograficamente esta unidade ocorre melhor caracterizada na margem direita do rio Passaúna, assim como nas porções norte e central das bacias, nestas onde os processos erosivos estão associados às áreas de nascentes e do médio curso dos rios, respectivamente. É possível, portanto, interpretar que existe forte controle das estruturas da rocha no relevo (anisotropia alta), aliado a intensos processos de dissecação (angulosidade alta), sob condições de influência antrópica moderada na cobertura vegetal. Verifica-se que o DVE ocorre significativamente, no contexto do embasamento cristalino (Complexo Atuba), apenas na bacia do rio Passaúna, e que sua ocorrência, sobre as mesmas rochas, não é relevante na bacia do rio Barigui. Tal condição indica características de dissecação diferentes entre as duas bacias, sendo que para a bacia do Passaúna, especialmente para a margem direita do rio, o relevo encontra-se mais dissecado, conforme evidenciado anteriormente por Salamuni *et al.* (2004).

No domínio das cristas e vales orientados (DCVO - UPG 3) a principal característica é a orientação das feições lineares do relevo na direção NW-SE. Embora tenham sido classificadas como de alto peso para definição da unidade, a anisotropia de relevo *per se* não define o DCVO. Isto se deve ao fato de que foram classificados com alto contraste entre a necessidade e a suficiência tanto a anisotropia baixa quanto alta. Entende-se que independente da magnitude da anisotropia, esta é importante na definição da unidade quando as cristas e vales ocorrem alinhados na direção NW-SE. Os demais atributos

11. Discussão dos resultados

descritores do relevo com relevância para a favorabilidade de ocorrência do DCVO foram os índices de vegetação (NDVI) alto e moderado e a densidade de relevo, porém com pesos significativamente menores que a anisotropia de relevo. Em relação às demais unidades, a UGP 3 mostra-se menos representativa em termos de área total, sendo constituída por pequenos agrupamentos de celas dispersos por toda a área das bacias. Os principais núcleos de ocorrência da unidade são localizados nas porções de cabeceiras dos rios Passaúna e Barigui, onde afloram rochas do Grupo Açungui, mas também dispersos por toda a bacia do rio Passaúna, em especial, sobre migmatitos e gnaisses do Complexo Atuba. Nas vertentes do baixo curso do rio Barigui o DCVO torna-se praticamente ausente. Nas demais áreas a unidade é encontrada tanto em áreas de base das vertentes como porções de divisores intermediários de água. Estas características revelam que o DCVO é condicionado pela baixa permeabilidade das formações superficiais (alta densidade de relevo), estas desenvolvidas sobre os filitos do Grupo Açungui e sobre os migmatitos e gnaisses do embasamento. A elevada densidade de relevo é resultado, também, da combinação de faixas de metacalcários orientadas na direção NE-SW (Grupo Açungui) segmentadas por diques de diabásio alinhados para NW-SE. O intemperismo diferencial entre estas duas rochas resulta em (1) aumento da densidade de relevo pela sucessão de cristas e vales, e (2) orientação preferencial das feições lineares de relevo na direção NW-SE, uma vez que os diques sustentam o relevo na forma de cristas. A presença do DCVO apenas na bacia do rio Passaúna, exceto por um pequeno remanescente no extremo sul da bacia do rio Barigui reflete, como no domínio das vertentes esculpidas (UPG 2), níveis de dissecação diferentes entre as duas bacias, conforme apresentado por Salamuni *et al.* (2004).

O domínio de colinas suaves (DCS - UPG 4) tem como características principais as declividades moderadas, densidade de relevo alta, angulosidade baixa, além de rugosidade e densidade de relevo moderadas. Estas condições indicam o predomínio da erosão laminar sobre a erosão linear, o que causa o rebaixamento homogêneo do relevo, sem entalhamento significativo dos talwegues. Também neste caso houve total compatibilidade entre os modelos conceitual e probabilístico. A área de ocorrência do DCS está restrita à região dos interflúvios Passaúna/Barigui e Barigui/Belém, este no limite leste da área

11. Discussão dos resultados

de pesquisa, assim como na região central da bacia do rio Barigui. Nestas condições, o domínio está associado especialmente às porções de interflúvios suaves onde ocorrem remanescentes dos sedimentos da Bacia de Curitiba, mas também sobre migmatitos do Complexo Atuba. Neste contexto a densidade de relevo elevada é causada pela baixa permeabilidade das formações superficiais desenvolvidas sobre estas rochas. Por sua vez, o elevado peso da angulosidade baixa indica que a dissecação nestes compartimentos já se encontra em estágio avançado, ou seja, atualmente prevalece a erosão laminar (rebaixamento homogêneo do relevo) sobre o entalhamento dos talwegues.

No caso do domínio das vertentes em dissecação acentuada (DVDA – UPG 5) os atributos com maiores pesos que definem são a rugosidade alta, densidade de relevo moderada, anisotropia baixa, angulosidade moderada, índice de vegetação (NDVI) alto, direção de anisotropia E-W e declividade moderada. Na bacia do rio Barigui o DVDA ocorre apenas nas porções central e norte, formando pequenos agrupamentos de celas, mais desenvolvidos sobre metacalcários do Grupo Açungui, no extremo norte. Já no contexto do embasamento cristalino, sobre gnaisses e migmatitos do Complexo Atuba, na bacia do rio Passaúna a unidade é mais desenvolvida, em todo o curso do rio (exceto na região de sua foz), formando agrupamentos consistentes de celas, em especial na margem direita, esta mais ampla em relação à margem oposta devido à assimetria entre as vertentes. As classes de rugosidade, densidade e angulosidade moderadas a altas revelam a característica de forte dissecação do relevo, com entalhamento significativo dos talwegues. Embora a anisotropia de relevo seja normalmente baixa, há predomínio de cristas e vales alinhados na direção E-W. Em relação à ocupação da unidade, os altos valores do índice de vegetação (NDVI), indicam baixa influência antrópica na cobertura vegetal. Entende-se que por se tratar de áreas mais acidentadas, com o relevo condicionado pelo desenvolvimento de processos de dissecação, o grau de antropização é, portanto, reduzido. Novamente é nítida a diferença entre as duas bacias, no que diz respeito às zonas de ocorrência do DVDA, em decorrência das diferenças de padrões de dissecação entre as bacias (SALAMUNI *et al.* 2004).

11. Discussão dos resultados

As unidades de paisagem geomórficas presentes nas bacias dos rios Barigui e Passaúna (FIGURA 56) revelaram importantes características distintivas entre as duas bacias. É nítida a diferença na distribuição das unidades nestas áreas. Na bacia do rio Passaúna predominam as unidades relacionadas ao predomínio de processos de dissecação do relevo, representada pelos domínios das vertentes esculpidas (DVE – UPG 2) e dos vales em dissecação acentuada (DVDA – UPG 5). Por sua vez, na bacia do rio Barigui são mais comuns os domínios das vertentes suaves (DVS – UPG 1) e de colinas suaves (DCS – UPG 4), exceto em seu alto curso, onde é mais comum a presença do domínio das vertentes esculpidas (DVE – UPG 2).

A constatação de que predominam unidades onde os processos de dissecação são mais efetivos no interior da bacia do rio Passaúna, em contraste com unidades melhor preservadas na bacia do rio Barigui, revela importante diferença nas características de evolução do relevo no curso dos dois rios, anteriormente destacadas por Salamuni *et. al* (2004). Entre as implicações da diferença do grau de dissecação das bacias destaca-se, na bacia do rio Barigui, a maior preservação de remanescentes tanto da Formação Guabirotuba, quanto das paleosuperfícies latossólicas (PS1-Pd1) e húmicas (PS2-Pd2), de Riffel (2006) e Ab'Saber; Bigarella (1961), com relevo mais suave. Nas vertentes da bacia do rio Passaúna o relevo é mais acidentado, por conta do entalhamento dos talwegues, o que resulta em perfis de solo mais rasos, ou mesmo ausentes, especialmente em seu baixo curso, além de remanescentes das paleosuperfícies menos expressivos em questão de área de ocorrência.

Quanto aos limites entre as diferentes unidades de paisagem geomórficas, podendo estes ser progressivos (variação progressiva) ou envoltórios (SOARES, FIORI, 1976), a metodologia probabilística não permitiu avaliar esta questão, já que é fundamentada na análise pontual, em celas. Assim os limites apresentados no mapa de probabilidade de ocorrência das UPGs (FIGURA 56) não levam em conta a gradação da estrutura horizontal da paisagem. Taborda (2010) também trata das limitações da definição automatizada de classes espaciais naturais. Na determinação de classes de solo, este autor verificou a geração de classes espúrias em posições de topos e divisores de água, além dos terços inferiores das vertentes, cuja causa

11. Discussão dos resultados

apontada foram generalizações cartográficas devidas à escala dos mapas topográficos aplicados. De forma a contemplar o problema da definição dos limites de unidades, técnicas adicionais como a aplicação de limites difusos poderiam ser aplicadas, porém estão além do escopo deste trabalho.

O nível de detalhamento obtido para a classificação das UPGs, fundamentado na associação de atributos descritores de relevo, é compatível com o quarto táxon, ou nível de abordagem geomorfológica, de Ross (1990). Neste nível de abordagem cada unidade é caracterizada por um conjunto de formas semelhantes, cujo limite para abordagens mais detalhadas é a necessidade de avaliação dimensional das formas de relevo.

Enquanto o modelo probabilístico de ocorrência de uma unidade, ou seja, a probabilidade de que esta ocorra, deriva dos pesos calculados através dos contrastes entre a necessidade e a suficiência das evidências, a ambiguidade resulta da incerteza da informação, tanto das evidências nas amostras fornecidas ao algoritmo, quanto da presença destas evidências nas celas alvo do mapeamento. A ambiguidade forneceu, portanto, indicativo importante quanto à qualidade da classificação realizada.

Comparando a técnica de classificação probabilística das UPGs com técnicas previamente descritas para este fim, é possível identificar tanto desvantagens como vantagens. A necessidade de discretização dos atributos morfométricos em classes implica na determinação de uma hipótese prévia, o que não ocorre quando aplicada técnica de mapeamento via redes neurais. Entretanto a aplicação de redes neurais envolve cálculos matemáticos bastante robustos, o que torna o processamento lento e exige *hardware* mais potente (TABORDA, 2010). Já os cálculos necessários à análise de favorabilidade são mais simples e rápidos, o que confere uma vantagem operacional. A atribuição de pesos, na análise de favorabilidade, é fundamentada no cálculo da necessidade e suficiência dos atributos para a ocorrência do evento, ou seja, não é empírica, o que contrasta com a definição de pesos para a aplicação das redes neurais. Para as duas técnicas a possibilidade de aplicação independentemente da pré-existência de mapas locais, ou em áreas contíguas, implica em grande potencial para sua difusão, principalmente em áreas carentes de mapeamentos temáticos.

12. Conclusões

A hipótese de trabalho, que preconizava o reconhecimento e o mapeamento de unidades de paisagem geomórfica através de uma metodologia multivariada, e fazendo uso de recursos de inteligência artificial e de combinação probabilística, mostrou-se verdadeira. Tal constatação mostra que embora a paisagem seja maior que o somatório dos diversos elementos (ou atributos) que a compõe, é possível, a partir da combinação destes elementos, aproximar uma delimitação dos diferentes compartimentos da paisagem natural.

Cada elemento componente da paisagem geomórfica, ou atributo descritor do relevo, representado na forma de mapa temático para área de pesquisa, forneceu critérios quantitativos para a distinção de diferentes padrões de relevo. Através da integração dos diversos atributos, avaliados quanto a ocorrência de padrões associativos, foi possível definir características recorrentes em cada unidade de paisagem geomórficas, estas usadas para sua diferenciação frente às demais.

Mostrou-se relevante a geração de novos atributos geomorfométricos, a partir da análise geoestatística do relevo. São apresentados os índices de rugosidade, angulosidade, densidade e anisotropia (e direção de anisotropia) de relevo, além da dimensão e ajuste da dimensão fractal, os quais fornecem importantes critérios para a interpretação das condições de relevo. As principais relações destes novos atributos geomorfométricos com a dinâmica das UPGs diz respeito às condições de permeabilidade dos solos (associada aos índices de densidade e de rugosidade do relevo), às condições de dissecação do modelado (proporcional ao índice de angulosidade do relevo), e a existência de controles litológico-estruturais do relevo (verificada através da anisotropia de relevo). Verificações em campo mostraram que os resultados da análise geoestatística do relevo foram compatíveis com as condições geológicas locais, atestando a robustez do método desenvolvido.

Como condição desejada para a aplicação da análise de favorabilidade, a análise e posterior seleção de atributos com baixos níveis de interdependências mostrou-se eficaz. Entretanto verificou-se que a exclusão da altitude, na análise de favorabilidade, resultou no agrupamento de planícies

12. Conclusões

atuais, planaltos e paleosuperfícies em uma única UPG, já que os atributos descritores do relevo para estes ambientes têm padrões associativos semelhantes. Entende-se que para realizar a distinção destes três compartimentos a variável altitude deveria ser integrada aos demais atributos, porém através de classes específicas, ou seja, em faixas de valores pré-definidos com base, por exemplo, na zona altimétrica de ocorrência de uma dada paleosuperfície. Esta constatação mostra que a experiência do técnico, aliada a pré-existência de material bibliográfico da região, podem representar significativo detalhamento dos resultados.

Ainda em relação à definição dos atributos integrados na análise de favorabilidade, a aplicação do índice de vegetação (NDVI), embora não tenha obtido pesos significativos na definição dos modelos probabilísticos para a ocorrência das UPGs, mostra que a inclusão de variáveis adicionais à metodologia apresentada é possível, devendo sua inclusão ser definida caso-a-caso, de acordo com os objetivos do mapeamento a ser realizado.

A construção de modelos conceituais utilizados para o teste metodológico, fundamentada no agrupamento estatístico dos atributos (k-médias), guiou de modo satisfatório a amostragem das cinco UPGs presentes na área de pesquisa, permitindo aplicar a análise de favorabilidade. Como resultado da análise de favorabilidade, os modelos probabilísticos de ocorrência de cada uma das cinco UPGs representam assinaturas geomórficas destas unidades, fundamentados no peso de que cada evidência (atributo) desempenha na favorabilidade de ocorrência de cada UPG. A comparação entre os modelos conceituais e probabilísticos (assinaturas geomórficas da paisagem) revelaram elevada correspondência, tanto em relação ao posicionamento das celas de uma mesma UPG em mapa (para os dois modelos), quanto em relação aos atributos que definem a assinatura de cada unidade (peso dos atributos).

A análise e interpretação do mapa final das unidades de paisagem geomórficas para as bacias dos rios Barigui e Passaúna revelou características distintas de dissecação bastante relevantes, anteriormente evidenciadas por Salamuni *et. al* (2004). Estas diferenças dizem respeito ao predomínio de unidades de paisagem associadas a processos de dissecação acelerada do relevo (domínios das vertentes esculpidas e em dissecação acelerada – UPGs

12. Conclusões

2 e 5) na bacia do rio Passaúna, enquanto a bacia do rio Barigui é caracterizada por unidades mais conservativas do relevo, como os domínios de vertentes suaves e de colinas suaves (UPGs 1 e 4). Nestas condições as paleosuperfícies latossólica e húmica, assim como a Formação Guabirotuba, constituem remanescentes mais amplos nas porções de colinas alongadas na bacia do rio Barigui, estando quase ausentes ou em interflúvios bastante restritos no interior da bacia do rio Passaúna, onde predominam solos rasos ou mesmo ausentes.

Conclui-se finalmente pela viabilidade e eficácia da nova metodologia proposta para o mapeamento de UPGs, passível de replicação em outras áreas, baseada na associação não-empírica dos atributos descritores do relevo. Entre as principais vantagens desta nova proposta metodológica estão: o cálculo da incerteza dos resultados, ou seja, uma avaliação de sua confiabilidade, a rapidez no processamento e a definição não-empírica dos pesos dos atributos na geração dos modelos preditivos das UPGs.

Também a aplicação desta nova metodologia permite a geração de mapas de unidades de paisagem geomórficas de forma rápida para áreas remotas, carentes de material cartográfico temático pré-existente. Neste âmbito, merece destaque o fato de que o mapa de unidades de paisagem geomórficas das bacias dos rios Passaúna e Barigui, gerados neste teste metodológico, representam importante detalhamento frente aos dados apresentados no mapa geomorfológico de maior escala disponível para a região, até então, em 1:250.000 (MINEROPAR, 2006).

13. Recomendações de trabalhos futuros

Com base nos métodos empregados no desenvolvimento desta proposta, é possível apresentar algumas indicações de linhas de atuação para trabalhos futuros, no que tange o desenvolvimento de processos automatizados para a cartografia de unidades de paisagem geomórficas.

Em relação à definição dos atributos a serem incorporados na análise de favorabilidade, a inclusão de novos mapas temáticos, visando atender ao objetivo ao qual se destina os mapas a serem gerados é interessante, pois permite que sejam ressaltadas feições de interesse específico. Também a delimitação de classes dos atributos com base em critérios específicos, como por exemplo, em faixas de valores restritos, pode resultar em melhora significativa dos resultados, sempre se levando em conta o objetivo final dos mapas a serem gerados.

Embora não tenha sido abordada de forma aprofundada neste trabalho, a questão da definição dos limites entre as diferentes unidades de paisagem é questão ainda a ser explorada. Entre os métodos que se apresentam como mais promissores, a aplicação da lógica difusa destaca-se quanto ao potencial para melhor definição espacial dos limites entre as unidades de paisagem geomórficas mapeadas.

14. Referências bibliográficas

- AB´SABER, A. N.; BIGARELLA, J. J. Considerações sobre a geomorfogênese da Serra do Mar no Paraná. **Boletim Paranaense de Geografia**, Curitiba, v. 4/5, p. 94-110. 1961.
- ABREU, A.A. A **teoria geomorfológica e sua edificação: análise crítica**. In: Revista Brasileira de Geomorfologia. União da Geomorfologia Brasileira. Ano 4, nº2, 51-67p. 2003.
- AGUASPARANÁ. Instituto das Águas do Paraná. **Mapa geológico da bacia do Alto Iguaçu**. Documento eletrônico. Acessado em: 13 de julho de 2011.
- ALMEIDA, F. F. M. The system of continental rifts bordering the Santos basin, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, São Paulo, v. 48, 15-26p. 1976.
- ASSELEN, S.; SEIJMONSBERGEN, A.C. Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using laser DTM, **Geomorphology**, 78, 309–320p. 2006.
- BATISTA, E. M.; SOUZA FILHO, P. W. M.; SILVEIRA, O. F. Fusão de dados SRTM com dados Landsat TM 5 para estudo geomorfológico: Região dos Cabos Orange e Cassiporé, Amapá. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil. INPE. 1741-1743p. 2005.
- BERGER, A.R. **The geoindicator concept and its application: An introduction**. Rotterdam, Netherlands: Balkema, 466p. 1996.
- BEROUTCHACHVILLI, N.; BERTRAND, G. Le géosystème ou système territorial naturel. **Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest**, v.49, n.2, 167-180p. 1978.
- BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: um esboço metodológico. **Caderno de Ciências da Terra – Revista IGEOG/USP**, São Paulo: USP, nº. 13, 1971.
- BERTRAND, G. (Org.); PASSOS, M. M. (Org.) **Uma geografia transversal – e de travessias (O meio ambiente através dos territórios e das temporalidades)**. 1ª ed. Maringá: Editora Massoni, v. 500. 332 p. 2007.
- BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D. International Symposium on the Quaternary. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n. 33, 370p. 1975.

14. Referências bibliográficas

- BIGARELLA, J.J.; MOUSINHO, M.R.; SILVA, J.X. Considerações a respeito da evolução das vertentes. **Boletim Paranaense de Geografia**, Curitiba, n. 16/17, p. 85-116. 1965.
- BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R. **Caracteres texturais dos sedimentos da Bacia de Curitiba**. Boletim da UFPR – Geologia, (7):1-164. 1962.
- BOLOS, M. **Manual de Ciência del Paisaje, Teoría, Métodos y Aplicaciones**, Barcelona: Alev, 273p. 1992.
- BORGES, M. E. S. **Mapeamento geomorfológico da Bacia do Rio Preto e sua relação com uso agrícola. Dissertação de Mestrado**. Gestão ambiental e territorial. Universidade de Brasília. 2008.
- BOULHOSA, M. B. M; SOUZA FILHO, P. W. M. Uso de imagens SRTM e Landsat ETM+7 para o mapeamento geomorfológico dos ambientes costeiros do noroeste do Pará. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil. INPE. 1745-1747p. 2005.
- BRABYN, L. Classification of macro landforms using GIS. **ITC Journal**, 1. 26-40p. 1997.
- CANALI, N.E.; MURATORI, A.M. **Síntese da evolução geomorfológica da Bacia Sedimentar de Curitiba**. In: Simpósio Regional de Geologia, 3, Atas, v.2, 335-362p. 1981.
- CARR, J. R. **Numerical analysis for the geological sciences**: Prentice Hall. 1995.
- CARR, J.R. Spectral and textural classification of single and multiple band digital images. **Computer and Geosciences**, 22, 849–865p, 1996.
- CAVALLI, M.; MARCHI, L. **Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR**. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 8, 323–333p. 2008.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2 ed., São Paulo, SP: Edgard Blucher, 1980.
- CHRISTOFOLETTI, A. A aplicação da abordagem em sistemas na geografia física. **Revista Brasileira de Geografia**. Rio de Janeiro, V. 52, nº 2, p. 21-35, 1990.
- CHRISTOFOLETTI, A. L. H. **Sistemas dinâmicos: A abordagem da Teoria do Caos e da geometria fractal em Geografia**. In: VITTE, A. C. & GUERRA, A. J. T. (org.) **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 2004.

14. Referências bibliográficas

- DIETRICH, W.E.; LIGON, F. **RIPPLE – A Digital Terrain-Based Model for Linking Salmon Population Dynamics to Channel Networks**. Prepared by Stillwater Sciences, Berkeley, California. 2008.
- DIKAU, R.; BRABB, E. E.; MARK, R. M. Landform classification of New Mexico by computer. U.S. Dept Interior, **U.S. Geological Survey**. Open-file report 91-634, 26 pp. 1991.
- DRÄGUT, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis, **Geomorphology**, 81, 330–344p. 2006.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR. **Carta de Solos do Estado do Paraná** Folha MIR – 516, SG-22-Y-A, E Londrina: EMBRAPA e IAPAR:1:250.000, 2008.
- FARINA, A. **Principles and methods in landscape ecology**. Londres: Chapman & Hall, 235p. 1998.
- FERREIRA, M. C. Mapeamento de unidades de paisagem com Sistemas de Informação Geográfica: alguns pressupostos fundamentais. **Geografia**, V.22, n.1, 23-36p, 1997.
- FIORI, A. P. Tectônica e estratigrafia do Grupo Açungui - PR. **Boletim IG-USP: Série Científica**, v. 23, 55-74P. 1992.
- FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. **Landscape ecology**. Londres: Chapman & Hall, 235p. 1986.
- GAO, B. NDWI- a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, 58, 257-266p, 1996.
- GOLDEN SOFTWARE. Surfer Version 9.9.785 – Mar 26 2010. **Surface Mapping System**. 2010.
- GORINI, M. A. V. Physiographic Classification of the Ocean Floor: A Multi-Scale Geomorphometric Approach. **Proceedings of Geomorphometry**. Zurich, Switzerland. 2009.
- GROHMANN, C.H.; SMITH, M.J.; RICCOMINI, C. Surface Roughness of Topography: **A Multi-Scale Analysis of Landform Elements in Midland Valley, Scotland**. In: Proceedings of geomorphometry, Zurich, Switzerland, 140-148p. 2009.
- GROHMANN, C.H.; SMITH, M.J.; RICCOMINI, C. **A Multiscale Analysis of Topographic Surface Roughness in the Midland Valley, Scotland**. In: Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol.PP, no.99, 1-14p, 2010.

14. Referências bibliográficas

- GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. dos S. **Geomorfologia Ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 192p. 2006.
- GUTH, P. L. Geomorphometry from SRTM: Comparison to NED. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 72, n. 3, 269–277p. 2006.
- HAYKIN, S. **Neural Networks**, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
- HENGL, T.; BAJAT, B.; DRAGAN, B.; REUTER, H. I. Geostatistical modeling of topography using auxiliary maps. **Computers & Geosciences**, 34(12), 1886-1899p. 2008.
- HOFFMANN, A.; VAN DER VEGT, J. W.; LEHMANN, F. Towards automated map updating: is it feasible with new digital data-acquisition and processing techniques? **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. Vol. XXXIII, Part B2. Amsterdam. 295-302p. 2000.
- KLIMASZEWSKI, V. Detailed geomorphological maps. **ITC Journal**. 265p. 1982.
- KLINGSEISEN, B.; METTERNICHT, G.; PAULUS, G. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. **Environmental Modelling & Software** 1-13p. 2007.
- LACOSTE, Y. A quoi sert le paysage? Qu'est-ce qu'un beau paysage? **Hérodote**, n.7, 3-41p. 1977.
- LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da Paisagem com SIG**. Oficina de Textos. São Paulo. 424p. 2009.
- LUCAS, O. W. R. **The design of forest landscapes**. New York: Oxford University Press, 391p. 1991.
- MAACK, R. Breves notícias sobre a geologia dos estados do Paraná e Santa Catarina. **Arquivo do Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas**, Curitiba, v. 2, p. 66-154. 1947.
- MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. Papelaria Max Roesner, Curitiba, PR. 1968.
- MARINI, O. J.; TREIN, E.; FUCK, R. A. **O Grupo Açungui no Estado do Paraná. In: BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R.; PINTO, V. M. (eds.) - Geologia do Pré-Devoniano e Intrusivas Subsequentes da Porção Oriental do Estado do Paraná. Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 23/25, 43-104p. 1967.

14. Referências bibliográficas

- MARTINELLI, M.; PEDROTTI, M. A cartografia das unidades de paisagem: questões metodológicas. **Revista do Departamento de Geografia**, Universidade de São Paulo. 14. 39-46p. 2001.
- MARTINS, S. P. **Classificação textural de imagens RADARSAT-1 para discriminação de alvos agrícolas. Dissertação de Mestrado.** Pós-graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 2005.
- MASSOQUIM, N. G. **Clima e paisagem da mesorregião centro-ocidental paranaense. Tese de Doutorado** em Geografia Física. Faculdade de Filosofia, Artes e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo. 2010.
- McGARIGAL, K; MARKS, B. J. **FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure.** Portland: Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 122p. 1995.
- McKEAN, J.; ROERING, J. . **Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry.** *Geomorphology*. 57(3-4): 331–351. 2004.
- MEIS, M.R.; MIRANDA, L.H.G. & FERNANDES, N.F. **Desnivelamento de altitude como parâmetro para a compartimentação do relevo: bacia do médio-baixo Paraíba do Sul.** In: Congresso Brasileiro de geologia, 32, 1982. Salvador. **Anais...** Salvador: SBG. 4:1489-1509. 1982.
- MELA, K.; LOUIE, J. N. Correlation length and fractal dimension interpretation from seismic data using variograms and power spectra. **Geophysics**, 5, vol 66. 1372-1378p. 2001.
- MENDONÇA, F. de A.; VENTURI, L. A. B. Geografia e metodologia científica. In: Simpósio de Geomorfologia. **Revista Geosul**, n. especial, Florianópolis, 1998.
- MINEROPAR, Minerais do Paraná; UFPR Universidade Federal DO Paraná. **Atlas geomorfológico do Estado do Paraná – Escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000.** Curitiba, 63p. 2006.
- MONTGOMERY, D. R. Process domains and the river continuum. **Journal of the American Water Resources Association** 35: 397-410p. 1999.
- MULTISPEC. **Multispectral Image Data Analysis System.** Fundação de Pesquisa da Universidade de Purdue. 2012. Aplicativo computacional.
- MURATORI, A. M.; ROCHA, O. **Compartimentação morfológica da região metropolitana de Curitiba.** In: Congresso Latinoamericano de Geologia, 7., Belém. **Anais...** Belém. p. 606-617. 1988.

14. Referências bibliográficas

- NASA: Shuttle Radar Topographic Mission SRTM.
<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm> - acesso em 09 de janeiro de 2010.
- OKA-FIORI, C. **Contribuição ao estudo das formações superficiais das quadrículas de Piracicaba e São Pedro. Dissertação de Mestrado.** Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. 121p. 1980.
- OKA-FIORI, C. – **Geomorfologia e dinâmica têmporo-espacial da bacia do rio Itiquira, Pantanal Mato-grossense-MT, MS. Tese de Doutorado** UNESP. 209p. 2002.
- OLIVEIRA, C.G.; PARADELLA, W.R. An Assessment of the Altimetric Information Derived from Spaceborne SAR (RADARSAT-1, SRTM3) and Optical (ASTER) Data for Cartographic Application in the Amazon Region. **Sensors**, 8: 3819-3829p. 2008.
- PEDROSO, E. C., CROSTA, A. P., SOUZA FILHO, C. R. Classificação textural de feições geológicas por variogramas na província mineral do Tapajós a partir de imagens JERS-1 / SAR. **Anais do IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Santos, Brasil. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1171-1181p. 1998.
- RIFFEL, S. B. **Curva hipsométrica no mapeamento de paleosuperfícies: abordagem quantitativa. Dissertação de mestrado.** Universidade Federal do Paraná. Pós Graduação em Geologia. 2005.
- RISSE, P. G. **Landscape ecology: state-of-the-art.** In: TURNER, M. G. Landscape heterogeneity and disturbance. New York: **Springer-Verlag**, p. 3-14. 1987.
- ROMSTAD, B. Improving Relief Classification with Contextual Merging. Proceedings of ScanGIS'20. **The 8th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science**. As, Norway; 3-13p. 2001.
- ROSS, J. L. S. **Geomorfologia, ambiente e planejamento.** São Paulo, Ed. Contexto. (Repensando a Geografia), 85p. 1990.
- ROSS, J. L. S. **Suporte da Geomorfologia Aplicada: os táxons e a cartografia do relevo.** In: IV Simpósio Nacional de Geomorfologia. São Luís (MA), UFMA. CD-ROM. 2002.
- ROUGERIE, G. e BEROUDCHACHVILI, N.L. **Géosystèmes et paysages. Bilan et méthodes.** Paris: Armand Colin, 320 p. 1991.
- SALAMUNI, E. **Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR).** Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista-Rio Claro. **Tese de Doutorado**, 214 p. 1998.

14. Referências bibliográficas

- SALAMUNI, E.; EBERT, H. D.; BERNARDI, J. V. E.; BORGES, M. S. Mapeamento do contorno estrutural do embasamento da bacia sedimentar de Curitiba – PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 45, 133-148p. 1997.
- SALAMUNI, E.; EBERT, H. D.; HASUI, Y. Morfotectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba. **Revista Brasileira de Geociências**, Volume 34. 469-478p. 2004.
- SALAMUNI E., HASUI Y., COSTA J.B.S., BORGES M.S., EBERT H.D. **Sobre a tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR/BR)**. In: Cong. Uruguayo de Geologia, 2, Punta del Este. **Actas**, 1:10-15. 1998.
- SALAMUNI, E.; SALAMUNI, R.; EBERT, H.D. Contribuição à geologia da Bacia Sedimentar de Curitiba. **Boletim Paranaense Geociências**, (47):123-142p. 1999.
- SAMPAIO, T. V. M. Índice de Concentração da Rugosidade (ICR): uma proposta para o mapeamento morfométrico via emprego de geotecnologias. **XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. Viçosa – MG. 2008.
- SCHUMM, S.A. The role of creep and rainwash on retreat of badland slopes. **American Journal Science** 254, 693-706. 1956.
- SIGA JÚNIOR, O.; BASEI, M. A. S.; REIS NETO, J. M.; MACHIAVELLI, A.; HARARA, O. M. O Complexo Atuba: um cinturão Paleoproterozóico intensamente retrabalhado no Neoproterozóico. **Boletim do Instituto de Geociências**, São Paulo, v. 26, 69-98p. 1995.
- SILVA, D. R.; AMARO, V.E. Integração entre dados ópticos e radar (SRTM) para a caracterização geoambiental da costa setentrional do Rio Grande do Norte. **Revista Geográfica Acadêmica**. Vol2. N2. 111-123p. 2008.
- SKIDMORE, A. K.; BIJKER, W.; SCHMIDT, K.; KUMAR, L. Use of remote sensing and GIS for sustainable land management. **ITC Journal**. 1997.
- SOARES, P.C. Incertezas no raciocínio geológico: um ensaio. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n. 48, p. 71-88. 2000.
- SOARES, P. C. **Anfavin: aplicativo para análise de favorabilidade georreferenciada pela regra de Bayes num ambiente de incertezas**. Curitiba, UFPR. Programa em Turbobasic®. Disponível com o autor. 2011a.
- SOARES, P. C. **REL_AN.EXE: aplicativo para análise do relevo**. Curitiba, UFPR. Programa em Turbobasic®. Disponível com o autor. 2011b.

14. Referências bibliográficas

- SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 16, n. 32, p. 71-104. 1976.
- SOARES, P. C.; LANDIM, P.M.B. Depósitos Cenozóicos no Centro Sul do Brasil. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, n.16, v. 31, p.17-39. 1976.
- SOARES, P. C.; RIFFEL, S. B. Hypsometric curves as tool to paleosurface mapping. **Mathematical Geology Journal**, 2006.
- SOARES, P. C.; RIFFEL, S. B.; FIORI, A. P. Geomorphological and geophysical evidences for neotectonics, central and southern Brazil. **13º Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos – VII International Symposium on Tectonics**– 401-404p. 2011.
- SOARES, P. C.; SOARES, A. P.; FIORI, A. P. Raciocínio probabilístico aplicado à suscetibilidade de escorregamentos: um estudo de caso, em Campo Largo, Paraná, Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n. 51, 59-76p. 2002.
- SOCTCHAVA, V. B. **Introdução à teoria dos geossistemas** (original em russo) Novosibirsk: Editora Nauka, 319p. 1979.
- STRAHLER, A. N. Hypsometric (areal-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, New York, v. 63, p. 1117-1142. 1952.
- TREVISANI, S.; CAVALLI, M.; MARCHI, L. Variogram maps from LiDAR data as fingerprints of surface morphology on scree slopes. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 9, 129-133p. 2009.
- TROLL, C. Landscape ecology (geo-ecology) and biogeocenology: a terminalogical study. **Geoforum** 8: 43-46. 1971.
- TROLL, C. A Paisagem Geográfica e Sua Investigação. In: **Revista Espaço e Cultura**. Organizadores: R. L. Corrêa & Z. Rosendhal. Rio de Janeiro: UERJ/NEPEC, n°4, p. 1-7, Junho. 1997.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, 8, 127–150. 1979.
- TURNER, M. G.; GARDNER, R. H. **Quantitative methods in landscape ecology: the analysis and interpretation of landscape heterogeneity**. New York: Springer Verlag, 536p. 1990.

14. Referências bibliográficas

URBAN, D. L.; O'NEILL, R. V.; SHUGART, JR. H. H. Landscape ecology: a hierarchical perspective can helps scientists understand spatial patterns. **BioScience**, v.37, 119-127p. 1987.

ANEXO 1

Comprovante de submissão e cópia de artigo submetido para publicação na
Revista Geociências:

“INTERPRETAÇÃO GEOMORFOMÉTRICA DE PARÂMETROS
VARIÓGRÁFICOS DO RELEVO”

Ofic. revgeoc. 328

Rio Claro, 23 de Fevereiro de 2012.

Ao

Sr. Daniel Fabian Bettú

Ilmo. Sr.,

Vimos pela presente agradecer a submissão do artigo **“Interpretação geomorfométrica de parâmetros varilográficos do relevo.”**, que está em análise pelo corpo consultivo da Revista Geociências.

Atenciosamente



Marcos Aurélio Farias de Oliveira

ANEXO 2

Lista dos pontos de verificação de campo

Lista dos pontos de verificação em campo.
Coordenadas UTM – SAD69 – zona 22 Sul

Nome do Ponto	Coordenada X	Coordenada Y	Altitude
1	672581	7196876	905
2	671565	7197772	906
3	670773	7199386	935
4	670895	7204414	973
5	671020	7205396	975
6	671468	7207203	987
7	674001	7203468	967
8	673715	7203191	985
9	674081	7202814	975
10	673891	7203070	991
11	666392	7200915	1010
12	666026	7200724	1037
13	665811	7200510	1023
14	664801	7199344	974
15	665458	7197929	955
16	667916	7192735	977
17	673003	7192799	924
18	672290	7193996	949
19	672184	7194074	961
20	671835	7194911	993
21	669838	7196189	1019
22	669286	7196217	1030
23	666651	7196079	962
24	664436	7183992	957
25	662084	7183374	921
26	661297	7181240	954
27	661358	7178392	966
28	660752	7177124	903
29	661273	7176222	897
30	659879	7175780	946
31	659043	7174497	962
32	660414	7172683	896
33	661146	7169402	912
34	666611	7172497	886
35	667853	7177595	926
36	667774	7176075	899
37	667621	7177703	894
38	665260	7182382	943
39	665694	7184812	960

Nome do Ponto	Coordenada X	Coordenada Y	Altitude
40	668482	7185539	932
41	670454	7186270	935
42	670863	7188072	939
43	670572	7189188	914
44	671628	7196619	971
45	659528	7193341	987
46	660701	7193676	977
47	661792	7193721	1031
48	663036	7190077	941
49	662012	7190326	947
50	663039	7190152	926
51	662694	7183520	924
52	661265	7176211	920
53	669453	7186356	881
54	664288	7186674	956
55	664800	7189623	975
56	671334	7194801	1001

ANEXO 3

Mapa das Unidades de Paisagem Geomórficas das bacias hidrográficas dos
rios Passaúna e Barigui
Escala 1:50.000

